

# DERIVAZIONE IDROELETTRICA SUL FIUME ADDA *a valle del nuovo ponte sulla SS591*

*"Piccola derivazione" ai sensi dell'art. 6 del R.D. 1775/1933*

*Valutazione di impatto ambientale artt. 23-24-25-26 D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.*

## RELAZIONE GEOLOGICA

DATA PROGETTO <b>Dicembre 2012</b>	AGGIORNAMENTO <b>Novembre 2013</b>	SCALA	ELABORATO <b>4.1</b>
---------------------------------------	---------------------------------------	-------	-------------------------

### GRUPPO DI PROGETTAZIONE

### PROPONENTE

**Capellino**  
Studio di Ingegneria

**STUDIO DI INGEGNERIA**

**Dott. Ing. ANTONIO CAPELLINO**

Via Rosa Bianca, 18

12084 Mondovì - (CN)

☎ 0174/551247

335/6560172

✉ studiocapellino@alice.it

**Dott. Arch. DANIELE BORGNA**

Via G. Pascoli, 39/6 - 12084 Mondovì (CN)

☎ 339-3131477

✉ arch.borgna@virgilio.it

**Geom. ALBERTO BALSAMO**

S.S. 28 Nord, 6 - 12084 Mondovì (CN)

☎ 347-4097196

✉ alberto.balsamo@geopec.it

**Dott. Ing. ALBERTO BONELLO**

Strada di Pascomonti - 12084 Mondovì (CN)

☎ 328-4541205

✉ alberto.bonello@ingpec.eu



**Sis.Co. In.**

**Dott. Ing. BARTOLOMEO DOMINICI**

Via Bucci, 2

10022 CARMAGNOLA - (TO)

☎ 011/9711820

337-221887

✉ ing.dominici@virgilio.it

**STUDIO TECNICO**

**Dott. Geol. Luca Bertino**

Via Risorgimento, 6

12084 Mondovì (CN)

☎ 0174/41589

✉ lucabertino@libero.it



**EDISON S.p.a.**

Sede Legale:

Foro Buonaparte, 31 - 20121 Milano

Partita IVA 12921540154

☎ 02/6222.7534

02/6222.8480

www.edison.it

✉ PEC: asee@pec.edison.it

---

## INDICE

<b>1.</b>	<b>PREMESSA E SINTESI .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>DESCRIZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO .....</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>INQUADRAMENTO GENERALE DELL'IMPIANTO .....</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>ASPETTI GEOLOGICI GENERALI .....</b>	<b>7</b>
4.1.	<i>La formazione della Pianura Padana .....</i>	<i>7</i>
4.2.	<i>Metodologie .....</i>	<i>8</i>
4.3.	<i>Cartografia d'inquadramento e ricerca storica e bibliografica .....</i>	<i>9</i>
4.4.	<i>Cenni dell'evoluzione recente del territorio .....</i>	<i>11</i>
<b>5.</b>	<b>GEOMORFOLOGIA ED ELEMENTI PEDOLOGICI .....</b>	<b>12</b>
5.1.	<i>Processi genetici .....</i>	<i>12</i>
5.2.	<i>Caratteristiche geologiche-geomorfologiche .....</i>	<i>13</i>
5.3.	<i>La valle del Fiume Adda .....</i>	<i>14</i>
<b>6.</b>	<b>IDROGRAFIA E IDROLOGIA .....</b>	<b>16</b>
<b>7.</b>	<b>IDROGEOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
7.1.	<i>Alimentazione e deflusso degli acquiferi .....</i>	<i>19</i>
7.2.	<i>Permeabilità dei terreni .....</i>	<i>21</i>
<b>8.</b>	<b>INDAGINE GEOTECNICA PRELIMINARE .....</b>	<b>22</b>
<b>9.</b>	<b>ASPETTI GEOTECNICI .....</b>	<b>26</b>
<b>10.</b>	<b>INDAGINE GEOFISICA A SISMICA PASSIVA .....</b>	<b>27</b>
10.1.	<i>La tecnica impiegata .....</i>	<i>27</i>
10.2.	<i>Strumentazione utilizzata e procedura di analisi dati .....</i>	<i>28</i>
10.3.	<i>Valutazione delle misure. Il progetto Sesame .....</i>	<i>29</i>
<b>11.</b>	<b>STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....</b>	<b>29</b>
11.1.	<i>Cenni teorici sulla curva di dispersione da indagine pseudo-MASW .....</i>	<i>30</i>
<b>12.</b>	<b>ANALISI DELLE MISURE DEL MICROTREMORE SISMICO .....</b>	<b>31</b>
<b>ALLEGATI</b>		

---

## 1.           **PREMESSA E SINTESI**

La presente relazione illustra l'esito dei rilievi e delle elaborazioni condotte per la definizione degli aspetti geologici, idrogeologici e sismici del sito d'indagine. La seguente trattazione tiene inoltre conto di quanto contenuto nei rispettivi territori dei comuni limitrofi relativamente ai rispettivi Piani di Governo del Territorio ai sensi della L.R. 11 marzo 2005 n.12 "Legge per il governo del territorio", con le modalità indicate nella deliberazione di Giunta Regionale n° 8/7374 del 28 maggio 2008.

Le osservazioni e le indagini in situ sono state integrate dallo studio e dalle conoscenze sulle caratteristiche idrologiche e idrauliche del fiume Adda e gli effetti sul territorio circostante delineate negli studi per il PAI, dell'Autorità di bacino del Fiume Po (anni 2003-2005) ed inoltre la vasta documentazione concernente l'Adda sublacuale, da Lecco alla foce in Po.

Il settore in oggetto è inserito nel Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), predisposto dall'Autorità di Bacino Fiume Po e approvato con D.P.C.M. 24 maggio 2001, all'interno degli elenchi contenuti negli allegati 1 (Corsi d'acqua oggetto di delimitazione delle fasce fluviali) e 2 (Comuni interessati dalle fasce fluviali) al Titolo II del Piano stesso, il cui ambito territoriale di riferimento è costituito dal sistema idrografico dell'asta del Fiume Po e dei suoi affluenti, nel caso specifico i fiumi Serio e Adda; secondo tali elenchi il territorio comunale è interessato dal tracciamento delle fasce di pertinenza fluviale dei due corsi d'acqua citati, che individuano le aree o fasce adiacenti all'asta del fiume soggette a diversi gradi di pericolosità idraulica, rappresentate nella cartografia contenuta nell'Elaborato n. 8 del PAI, Tavole di delimitazione delle fasce fluviali, in scala 1:25.000 (allegato 4). Le Norme per le Fasce Fluviali, contenute nel Titolo II delle Norme di Attuazione del PAI, specificano agli articoli 24, 25 e 27 finalità, ambiti territoriali ed effetti del Piano, oltre a classificare, all'art. 28, le fasce fluviali, di seguito tracciate con apposito segno grafico nelle Tavole contenute nell'Elaborato n. 8 e così definite, in ordine decrescente di rischio idraulico:

- Fascia A o fascia di deflusso della piena, costituita dalla porzione di alveo sede prevalente del deflusso della corrente [...],
- Fascia B o fascia di esondazione, esterna alla precedente, [...],
- Fascia C o fascia di inondazione per piena catastrofica, costituita dalla porzione di territorio esterna alla Fascia B [...].

---

L'esito delle indagini in sito, la raccolta della documentazione e le elaborazioni hanno consentito di confermare l'assenza di importanti problematiche di carattere geotecnico, con una generale uniformità dei terreni nell'area in esame, dove sono prevalenti ghiaie sabbiose almeno per alcune decine di metri. Le prove penetrometriche e sismiche effettuate, hanno consentito inoltre di escludere la presenza di strutture sepolte superficiali in grado di determinare significative amplificazioni dello scuotimento sismico.

## **2. DESCRIZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO**

L'area di intervento è sita sul Fiume Adda, poco a valle della confluenza con il Fiume Serio, in un settore di confine tra i comuni di Bertonico, Ripalta Arpina, Gombito e Montodine.

Il tratto di Fiume Adda in questione appartiene al ramo sublacuale, emissario del Lago di Como e maggiore tributario sinistro del Fiume Po. In particolare il tratto in oggetto è quello finale, più prossimo all'immissione nel Fiume Po, dove il corso d'acqua presenta andamento particolarmente sinuoso.

La traversa fluviale il cui salto è interessato dal progetto andrà ad interessare l'ansa di un ampio meandro percorsa dalla ex strada statale 591 Creasca (SS 591). Ora strada provinciale ex SS 591 Creasca, il cui percorso è stato modificato con un nuovo ponte strallato realizzato circa 500 m più a monte del sito in oggetto.

---

### 3. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impianto idroelettrico in progetto ad acqua fluente utilizza il salto idraulico formato dall'ansa a valle del ponte della Strada Statale Crema – Codogno. Pertanto la centrale si configura come un taglio di meandro.



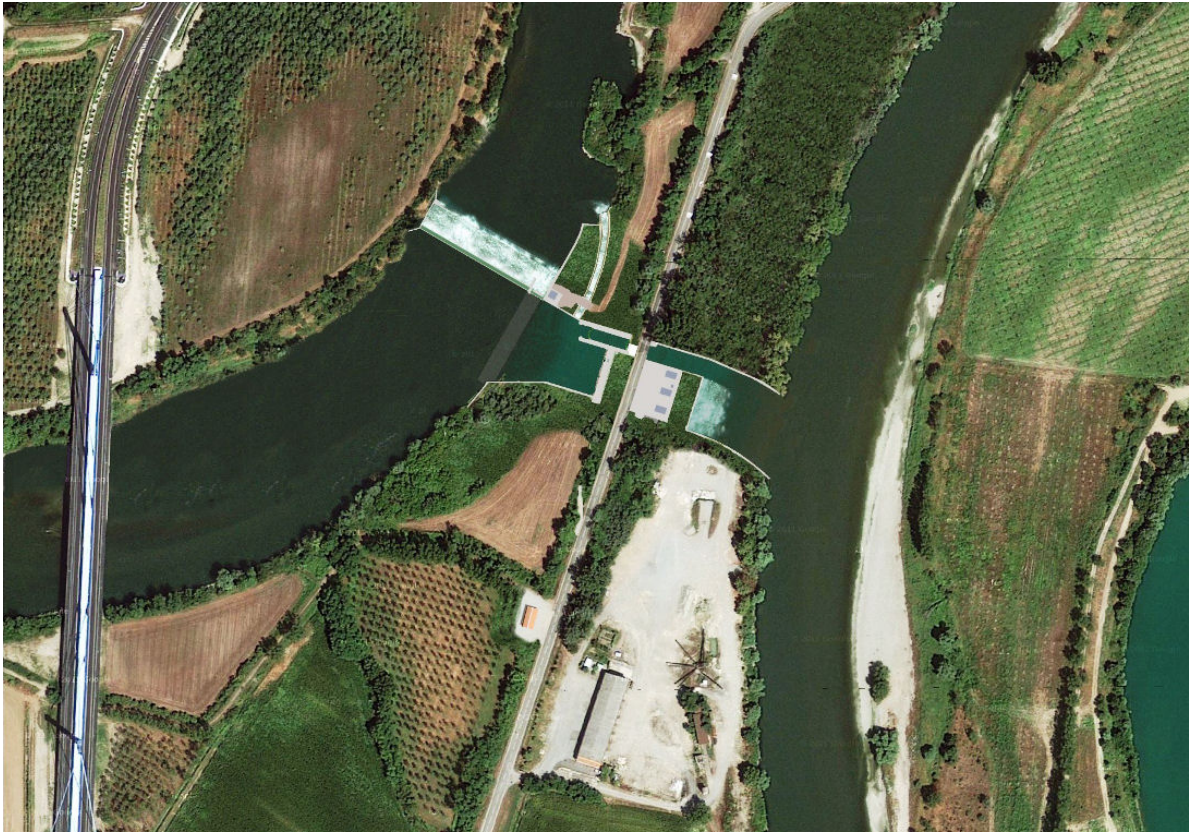
*Figura 1: dettaglio dell'area di intervento*

L'impianto, particolarmente compatto, è situato sulla sponda destra orografica presso il punto di maggiore vicinanza tra il ramo di monte e quello di valle dell'ansa.

Le opere che costituiscono la centrale idroelettrica in progetto sono:

- traversa fluviale;
- opera di presa ed adduzione;
- centrale idroelettrica;
- canale di restituzione;
- edificio per la trasformazione e cessione dell'energia;
- cavidotto interrato;
- conca di navigazione.

Nella figura che segue è illustrata la simulazione della situazione in progetto.



*Figura 2: simulazione della situazione in progetto*

Ad eccezione del piccolo edificio la trasformazione e cessione dell'energia alla rete di distribuzione nazionale, tutte le opere che formano l'impianto idroelettrico in progetto sono di tipo interrato o semi-interrato.

Si precisa che l'edificio emergente è ricavato in sponda destra orografica a tergo dell'argine esistente di delimitazione della fascia fluviale B, quindi in un'area idraulicamente neutra, anche durante gli eventi di piena.

---

## **4. ASPETTI GEOLOGICI GENERALI**

### **4.1. La formazione della Pianura Padana**

La formazione e l'evoluzione della Pianura Padana di cui fa parte la pianura cremonese è dovuta principalmente all'orogenesi alpina prima e successivamente all'orogenesi appenninica, costituendo inizialmente l'avanfossa del sistema alpino e poi di quello appenninico. L'avanfossa che si formò in corrispondenza dell'attuale Pianura Padana presenta un profilo asimmetrico con sedimenti che possono raggiungere anche 7000 m di spessore. Dal Pliocene (circa 7 milioni di anni fa) fino ad oggi la depressione rappresentata dall'avanfossa è stata gradualmente colmata dalla deposizione di sedimenti sia marini che continentali che si sono accumulati su un substrato miocenico continentale caratterizzato da una monoclina pedalpina regionale che si estende dal margine alpino a nord fino alla base della catena alpina a sud.

L'attività dei fiumi presenti nel settore di pianura padana cremonese è la principale causa della formazione dell'ambiente attuale con significativi condizionamenti dovuti alle glaciazioni ed ai fenomeni di subsidenza differenziali in corrispondenza di sinclinali e anticlinali sepolte. La porzione di pianura lombarda, in cui si colloca il territorio in esame, nel suo assetto attuale, è il risultato dell'azione di numerosi corsi d'acqua che hanno, in successivi tempi geologici e storici, apportato e asportato sedimenti fluviali sul bacino marino costiero, soggetto a fenomeni di subsidenza, che occupava l'odierna pianura padana. In particolare la gran parte dei depositi superficiali affioranti è il prodotto dell'attività fluviale, successiva all'ultima glaciazione wurmiana che si concluse circa 30000 anni fa. Lo scioglimento dei ghiacciai, liberando una gran quantità d'acqua in tempi geologicamente brevi (a partire dal Pleistocene superiore, 160000 anni fa, con il Pleniglaciale, Lascaux e Dryas I, epoche post wurmiane) ha comportato l'erosione dei grandi corpi morenici, edificati precedentemente dall'attività dei ghiacciai; i materiali erosi a monte o in prossimità dei depositi morenici depositi all'inizio delle vallate, furono depositi a valle. In questa fase si è venuto costituendo il complesso sedimentario chiamato "Livello Fondamentale della Pianura" o "Piano Generale Terrazzato", che occupa, oggi, gran parte della pianura padana. Questa

---

formazione è caratterizzata da un ambiente deposizionale ad energia decrescente dalla zona di erosione (anfiteatri morenici e valli alpine) alle zone di deposizione; per tale ragione depositi gradualmente più fini costituiscono il LFP, procedendo dal piede dei rilievi (Prealpi ed Appennini) verso il corso attuale del Po e, lungo il corso del fiume, verso la sua foce. Nella frazione di pianura oggetto della ricerca si è riscontrata la deposizione di sedimenti prevalentemente sabbiosi. Al compimento della fase immediatamente postglaciale, è seguita una fase erosiva che ha portato alla formazione delle grandi strutture morfologiche delle valli del Po e dei suoi principali affluenti (Adda, Serio, Oglio). Queste valli sono delimitate da orli di terrazzo morfologico che possono raggiungere fino a 10 m di altezza, al piede dei quali si trovano terrazzi secondari intermedi che indicano un altro, più limitato, ciclo di erosione - deposizione, interposto fra la fase deposizionale postglaciale e la fase erosiva attuale testimoniata dal corso attuale dei fiumi. Per comprendere l'assetto attuale della pianura bisogna considerare che nella fase intermedia, erano in attività corsi d'acqua oggi estinti o molto ridimensionati che hanno dato luogo a significative valli fluviali che sono ben più monumentali rispetto all'entità dei corsi d'acqua che oggi vi scorrono, ma che hanno lasciato segno del loro passaggio nei sedimenti depositi anche parecchi km di distanza dagli alvei attuali.

#### **4.2. Metodologie**

La presente indagine è basata, in via preliminare, sull'esame dei diversi documenti e dati di carattere geologico, geomorfologico e pedologico disponibili (vedi la Bibliografia). In una fase successiva si è provveduto ad eseguire l'indagine geomorfologica di dettaglio così articolata:

- analisi foto interpretativa di immagini aeree (ortofoto) e di immagini satellitari (Digital Globe, map data 2007 Teleatlas);
- analisi morfometrica su base cartografica IGM 1:25000 (levate del 1890, del 1921, del 1935 e del 1971), finalizzata all'individuazione dei cambiamenti ambientali intercorsi fra le varie levate considerate;
- analisi morfometrica su base cartografica (C.T.R. della Regione Lombardia, alla scala 1:10.000) finalizzata all'individuazione delle variazioni altimetriche e di forme difficilmente apprezzabili in fase di fotointerpretazione;



- 
- analisi delle carte geologiche d'Italia (1:100000, MICA, 1969), della carta geomorfologia della Pianura Padana (1:250000, MIUR, 1997), e della carta pedologica della Pianura Cremonese (1:100.000, ERSAL, 2000).

#### **4.3. Cartografia d'inquadramento e ricerca storica e bibliografica**

Per l'analisi geografica preliminare sono state consultate le seguenti carte geografiche:

Carta d'Italia I.G.M. 1:25.000:

Il mutamento, lento e graduale, avvenne tra l'XI ed il XIV secolo a seguito di alluvioni; il fiume Serio andò quindi ad occupare la sede che ancor oggi gli è propria e che lo porta a confluire nell'Adda nei pressi di Montodine, abbreviando il suo tracciato di una ventina di chilometri.

L'originaria valle, ormai abbandonata, rimase percorsa dai residui rami del corso fluviale, alimentati per lo più da acque sorgive, mentre paludi ed acquitrini occuparono per molti secoli queste terre fino alla completa realizzazione, intorno agli anni '30, dell'attuale canale artificiale del Serio Morto che ebbe l'importante funzione di drenare ogni ristagno d'acqua.

Per l'analisi geologica preliminare sono stati consultati i seguenti lavori:

- Servizio Geologico d'Italia, Carta Geologica d'Italia, 1969, scala 1:100.000, Foglio 60, Piacenza;

- Petrucci F., Tagliavini S., 1969, Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio 46, Treviglio e Foglio 60, Piacenza, Servizio Geologico d'Italia;

L'osservazione della carta geologiche del territorio in esame, permette di identificare la presenza di due formazioni Quaternarie, una più antica appartenente al Pleistocene superiore (fw) (Würm tra 75000 e 10000 anni fa) ed una più recente appartenente all'Olocene medio-superiore (a2) (Optimum climatico da 10000 anni fa ad oggi). Le due formazioni vengono così descritte:

- Fluviale würmiano (fw), costituito da alluvioni fluvioglaciali e fluviali, prevalentemente sabbiose, con lenti limose e sottili livelli ghiaiosi e con strato di alterazione superficiale di debole spessore, generalmente brunastro, talora rossastro per dilavamento di depositi preesistenti a monte. Esso forma l'esteso livello

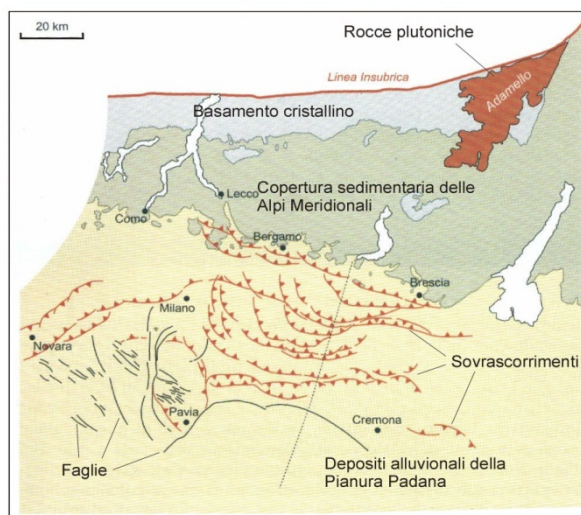
---

fondamentale della pianura (L.F.P.), con alte scarpate lungo i corsi d'acqua principali (zona ovest ed est del Comune);

- Alluvioni medio recenti (a2), affioranti nella zona centrale del territorio comunale (valle del Serio Morto) e costituite da depositi limosi, localmente sabbiosi e ghiaiosi anche attualmente esondabili.

L'assetto tettonico del basamento terziario al di sotto della coltre alluvionale quaternaria, appare interessato dalle complesse strutture messe in evidenza dalle ricerche petrolifere. La fig. 3 mette in evidenza la posizione e l'andamento di vari elementi strutturali (accavallamenti e pieghe) esistenti nel sottosuolo della pianura lombarda a nord del Po. Queste strutture sepolte consistono prevalentemente in sistemi di pieghe sud-vergenti ad orientamento ONO- ESE, caratterizzate da ripetuti fenomeni di ondulazione assiale, e da sovrascorrimenti.

A questi sistemi di pieghe sono inoltre associate numerose faglie longitudinali, che in alcuni casi, hanno dato luogo alla formazione di dorsali e fosse tettoniche. La comparsa di tali strutture è riferibile ad una fase tettonica di età pliocenica media, dal momento che i sedimenti più recenti coinvolti nella deformazione raggiungono a luoghi il Pliocene medio-superiore (circa 2 milioni di anni fa) e le strutture stesse sono ricoperte in discordanza dai sedimenti plio-pleistocenici marini.



Le strutture in questione, e in particolare le faglie, possono essersi comunque mantenute attive anche in epoche successive, condizionando la sedimentazione della sovrastante coltre quaternaria o dislocandone i termini più antichi (pre-würmiani). Questi movimenti tettonici recenti sono testimoniati da lembi di depositi fluviali del

---

Riss, che emergono, a guisa di piatti isolotti, dalle circostanti alluvioni würmiane, lungo gli assi di alcune strutture positive del substrato (zone di Romanengo, Volongo, Torre de Picenardi Tigozzi (Braga et alii, 1976)). Studi recenti (Burrato, Ciucci e Valensise, 2001) dimostrano che l'attività tettonica (sollevamenti e abbassamenti) di alcune di queste importanti strutture sepolte può influenzare l'andamento dell'idrografia superficiale, estremamente sensibile ai cambiamenti dei gradienti topografici indotti dall'attività tettonica. Sebbene gran parte di queste strutture sono sede di deformazioni continue ed essenzialmente asismiche, è comunque possibile che alcune di esse, oltre ad essere attive, siano anche sismogenetiche. Questa considerazione nasce dal fatto che esistono evidenti correlazioni tra la presenza di anomalie idrografiche superficiali, indotte dalle strutture sepolte, e importanti terremoti storici (terremoto di Soncino del 1802) localizzati in queste zone.

Non è da escludere che queste importanti strutture sepolte abbiano contribuito in modo decisivo al processo di diversione fluviale del fiume Serio, avvenuto tra l'XI ed il XIV sec (V.Ferrari, 1992). E' plausibile che i lenti movimenti tettonici verticali abbiano indotto impercettibili cambiamenti dei gradienti topografici superficiali, ponendo le basi affinché tale processo potesse realizzarsi definitivamente attraverso quel contributo climatico, storicamente documentato e comunemente riconosciuto come la causa principale della diversione del fiume Serio.

#### **4.4. Cenni dell'evoluzione recente del territorio**

La documentazione storico cartografica reperita delinea un territorio rimasto sostanzialmente immutato negli ultimi tre secoli in tutta la piana tardo pleistocenica e nel terrazzo elevato della piana olocenica. Profondi mutamenti sono invece occorsi nell'area perifluviale, dove la grande mobilità dell'alveo ha interessato in vari momenti l'area compresa tra l'attuale percorso dell'Adda.

Il percorso recente dell'Adda (CTR 1994) è rimasto sostanzialmente immutato negli anni recenti a causa delle opere di protezione spondali realizzate. La larghezza dell'alveo attivo nella documentazione storica esaminata è compresa tra 90 e 150 metri, estendendosi fino a circa 350 m in corrispondenza delle isole fluviali, mentre attualmente l'alveo attivo misura in larghezza da 50 a 100 metri, mantenendosi intorno ai 75 m per lunghi tratti.

---

## 5. GEOMORFOLOGIA ED ELEMENTI PEDOLOGICI

### 5.1. Processi genetici

La pianura padana è da considerarsi essenzialmente il prodotto di un processo di riempimento del bacino subsidente da parte di sedimenti di origine marina durante il pliocene. Con il primo Pleistocene, anche a seguito di processi di sollevamento in corrispondenza di “alti strutturali”, ha preso inizio la deposizione di ambiente transizionale, caratterizzata da fasi spiccatamente marine e depositi di origine continentale. I sedimenti formati, costituiti da limi intervallati da sabbie fini e strati torbosi, rappresentano la base sulla quale sono andate a deporsi grandi masse di sabbie e ghiaie di origine continentale, trasportate dalle Alpi e dagli Appennini verso valle dalle notevoli portate dei fiumi che caratterizzarono il pleistocene superiore durante le glaciazioni. Le coltri di materiale sabbioso-ghiaioso sono convenzionalmente attribuite a tre diverse fasi glaciali del Pleistocene medio e superiore, denominate Mindel (intorno a 0,7 milioni di anni fa), Riss (da 0,3 a 0,13 m.a.) e Würm (da 70.000 a 12.000 anni fa), anche se le fasi ora riconosciute nell’alta pianura sono più di una decina. I depositi che costituiscono la copertura alluvionale della pianura padana, sono quindi il prodotto del susseguirsi di più cicli erosivi e deposizionali, che hanno portato ciascuna delle coltri più giovani ad adagiarsi sulle altre, relativamente più antiche, tramite il parziale riempimento dei solchi vallivi profondamente incisi in queste, determinando frequenti giustapposizioni tra depositi di diversa età. Al termine dell’ultima fase glaciale la pianura era percorsa da fiumi di portata molto maggiore dell’attuale, di cui si ha chiara testimonianza nelle tracce dei paleovalvei posti sulla superficie del “Livello Fondamentale della Pianura”. L’analisi dei parametri di tali forme, in particolare l’ampiezza dei meandri e i raggi di curvatura, permette di ipotizzare che le portate potessero essere superiori di 5 - 6 volte rispetto a quelle degli attuali fiumi. L’abbondante deflusso è stato attribuito al clima freddo umido che avrebbero caratterizzato le fasi finali della glaciazione e la prima deglaciazione, che produsse grandi apporti di materiale alluvionale verso la pianura, reso disponibile anche dall’accumulo di materiale sciolto da parte dai ghiacciai allo sbocco delle vallate alpine (apparati morenici).

---

Tali processi, avvenuti in realtà mediante più cicli di avanzamento e ritiro dei ghiacciai, condussero alla formazione della porzione superiore del citato “livello fondamentale della Pianura”, mentre una successiva fase caratterizzata sia dalla diminuzione delle precipitazioni sia dall'intrappolamento dei sedimenti nei bacini lacustri formatisi a monte degli sbarramenti morenici (12), diede luogo alla migrazione del punto neutro dei fiumi<sup>4</sup> verso valle. Ebbe così inizio, in un periodo approssimativamente compreso tra i 7.500 ed i 10.000 anni fa, una decisa fase di erosione dei depositi fluvioglaciali dell'età würmiana, che unitamente a fenomeni locali di innalzamento della pianura per cause tettoniche, produsse le profonde incisioni che attualmente ospitano la fascia di divagazione dei meandri dei fiumi di origine alpina, dette piane oloceniche o valli fluviali di pianura, tra le quali quelle dell'Adda e del Lambro. Con il succedersi di fasi climatiche a diversa intensità, i fiumi hanno apportato e successivamente nuovamente eroso i sedimenti all'interno delle valli, producendo un complesso di depositi posti a quote che si differenziano di alcuni metri, che formano una serie di terrazzi inscatolati nel solco definito dal terrazzamento principale.

## **5.2. Caratteristiche geologiche-geomorfologiche .**

La situazione geologica complessiva del del sito in oggetto, compreso tra i comuni di Bertinico, Ripalta Arpina, Gombito e Montodine, risulta piuttosto uniforme; affiorano, infatti, unicamente depositi sciolti di origine fluvio-glaciale, articolati secondo l'assetto tipico dei terrazzi incastrati. Il ripiano morfologico più esteso è quello riferibile alla glaciazione wurmiana (Pleistocene Superiore), che assume significativamente il nome di “ Livello Fondamentale della Pianura” ed è caratterizzato da una marcata regolarità piano altimetrica. Tale superficie suborizzontale risulta solcata dalla depressione a fondo piatto dell'Adda.

Dal punto di vista geomorfologico, si distinguono i seguenti sistemi principali:

- Il Livello Fondamentale della Pianura (L.F.d.P), con il sottosistema della bassa pianura sabbiosa (LF);
- Le Valli di pianura dei maggiori fiumi, con i due sottosistemi delle alluvioni terrazzate (VT) e delle piane alluvionali attive (VA).

Sistema: VALLI DI PIANURA

---

Valli alluvionali corrispondenti ai piani di divagazione dei corsi d'acqua attivi o fossili, rappresentanti il reticolato idrografico olocenico.

a) Sottosistema: PIANE ALLUVIONALI ATTIVE (ALLUVIONI RECENTI)

Piane alluvionali inondabili con dinamica prevalentemente deposizionale, costituite da sedimenti recenti o attuali (Olocene recente ed attuale).

Sistema: LIVELLO FONDAMENTALE DELLA PIANURA

Piana fluvio-glaciale e fluviale costituente il livello fondamentale della pianura (L.F.d.P), formatasi per colmamento alluvionale durante l'ultima glaciazione würmiana.

Sottosistema: L.f.D.P. della BASSA PIANURA SABBIOSA

Porzione meridionale di pianura caratterizzata da aree sufficientemente stabili per la presenza di un'idrografia organizzata di tipo meandriforme; è costituita esclusivamente da sedimenti fluviali fini, privi di pietrosità in superficie e di scheletro nel suolo.

### **5.3. La valle del Fiume Adda**

Il Fiume Adda è uno dei principali affluenti del Fiume Po e primo per lunghezza complessiva dell'asta, distinta in sopralacuale e sublacuale, e secondo, dopo il Ticino, per portata media annua alla foce: la sua valle costituisce il principale elemento idrografico di una ampissima porzione della pianura padana. L'incisione fluviale, molto ben delineata, ampia e incavata nel settore meridionale del territorio comunale, ne costituisce anche il limite amministrativo con il comune di Bertonico, oltre che il confine tra le province di Cremona e Lodi.

All'incirca 600 m a monte di Bocca Serio, il cui toponimo è alquanto sintomatico, in Comune di Montodine, si ha la confluenza del Fiume Serio nell'Adda, mentre poche centinaia di metri oltre il confine comunale verso est, in territorio di Gombito, anche il Canale Colatore Serio Morto vi recapita le sue acque. In questo breve tratto la maturità delle forme fluviali appare evidente: il fiume scorre placidamente all'interno di un solco vallivo molto ampio e disteso, a fondo piatto, largo mediamente 150 m, sensibilmente inciso rispetto ai territori limitrofi e delimitato da una scarpata di altezza variabile tra i 5 e gli 8 m. Particolarmente significativo risulta l'ampio meandro in oggetto d'intervento

---

che descrive il corso d'acqua tra Bocca Serio e Gombito, con un caratteristico andamento sinuoso molto pronunciato, a formare una strozzatura che pare quasi poter generare un'isola circoscritta dal fluire della corrente, oggi ancora unita al resto della pianura da un sottile lobo di terra emersa. Lungo l'intero sviluppo di tale meandro è possibile osservare interessanti fenomeni di evoluzione fluviale: un osservatore che all'altezza di Bocca Serio si ponga al centro della corrente e con le spalle rivolte alla sorgente, può distinguere una sponda concava soggetta a erosione, quella di Bocca Serio – Gombito corrispondente alla sinistra idrografica, e una convessa soggetta a deposizione con sporadici fenomeni di sovralluvionamento, corrispondente alla sponda lodigiana in destra idrografica. Per questo motivo le due sponde appaiono così diametralmente diverse nell'aspetto: l'una, quella in territorio di Ripalta Arpina, molto ben definita, ripida e individuata da una netta scarpata, protetta a larghi tratti da imponenti scogliere in massi ciclopici, e quella opposta formata da una serie di spiaggioni formati da accumuli di ghiaia e sabbia quasi senza soluzione di continuità. Il percorso a meandri è quindi in questo tratto strettamente legato alle variazioni dovute a modificazioni nel rapporto erosione-deposizione che interviene alternativamente sulle due sponde opposte. La particolare conformazione dell'alveo in tale tratto inoltre lo pone in condizioni prossime al verificarsi del tipico fenomeno del "salto del meandro", che avviene quando la porzione centrale del lobo, compresa tra due anse successive, si riduce fino al punto in cui, ad esempio durante una piena, il fiume scava il breve tratto di collegamento creando un nuovo percorso rettilineo con conseguente aumento della velocità e della capacità erosiva. Per contrastare tale fenomeno, sulla sponda opposta a Bocca Serio, in territorio comunale di Bentonico, è stata realizzata una serie di pennelli trasversali onde distanziare la corrente dalla sponda vera e propria, con l'intento di concentrarne al centro dell'alveo la maggiore forza erosiva e la capacità di trasporto solido. Immediatamente alle spalle dell'alveo vero e proprio si sviluppa la relativa valle alluvionale, in questa zona particolarmente ampia, a causa anche della sua coalescenza con la valle del Fiume Serio, formata da aree completamente pianeggianti anche attualmente esondabili in caso di eventi di piena catastrofici, stante la totale assenza di arginature e difese. La valle è priva di terrazzamenti secondari ed è delimitata da una serie di scarpate erosive a due o tre balze, per un dislivello complessivo di 10-12 m, che ne segnano il passaggio al Livello Fondamentale della Pianura.

---

## 6. IDROGRAFIA E IDROLOGIA

Sotto il profilo idrologico è possibile distinguere il tratto prelacuale da quello a valle della diga di Olginate. In quest'ultimo il regime idrologico è strettamente connesso alla regolazione della diga e alle notevoli derivazioni per uso industriale ed irriguo (Canale Martesana - 32 m<sup>3</sup>/s, Canale Retorto - 18 m<sup>3</sup>/s, dal Canale Muzza - 112 m<sup>3</sup>/s e Canale Vacchelli - 38.5 m<sup>3</sup>/s) che prelevano un massimo di 230 m<sup>3</sup>/s distribuito dalla metà giugno alla metà di settembre su un territorio di 130.000 ha. In inverno la distribuzione di acqua iemale per uso irriguo è di circa 90 m<sup>3</sup>/s. Il regime dell'Adda sottolacuale è fortemente influenzato dalle suddette utenze e nel periodo 1971 – 1980, per il quale sono disponibili i dati idrometrici, si osserva nei valori medi mensili la presenza di un massimo assoluto nel mese di ottobre ed un minimo nei mesi di dicembre gennaio ed agosto. I valori massimi giornalieri si registrano da Settembre a Novembre mentre i valori minimi si hanno generalmente nei mesi invernali.

L'alveo a sud di Lodi è unicursale, attualmente privo di isole fluviali, con elevata sinuosità, talora ridotta da interventi artificiali di rettificazione l'alveo. L'alveo tipo E nella classificazione del Trevisan<sup>6</sup>, caratterizzato da un'evoluzione relativamente rapida dovuta principalmente all'erosione delle sponde sabbiose, e da una tendenza alla deposizione nell'alveo e nella piana alluvionale.

Negli ultimi decenni si è assistito ad un generale abbassamento dell'alveo provocato sia dagli interventi di rettifica che dall'eccessivo prelievo d'inerti in alveo e dall'abbassamento della quota di recapito nel Po, con effetti negativi sulle pile di numerosi ponti e sulle opere di protezione spondale. Inoltre la presenza di queste ultime ha contribuito al restringimento della sezione dell'alveo aumentando la velocità di deflusso. Localmente si possono individuare lievi fenomeni di elevazione dell'alveo, anche in tratti complessivamente soggetti ad erosione, che si manifestano con locali accumuli d'inerti.

Nel settore in oggetto d'intervento i meandri hanno una curvatura accentuata su cui sono inserite opere di protezione spondale, e mostrano locali tendenze all'erosione. L'alveo ha una larghezza media di 100-120 m, con valori inferiori all'uscita delle curve, e un'altezza media di sponda di 6-7 m. Il materiale d'alveo è di tipo ghiaioso, con lenti di sabbia molto consistenti.



---

## 7. IDROGEOLOGIA

La successione di terreni prevalentemente sabbiosi attribuiti alle fasi glaciali giacciono, come detto, su sedimenti più fini formati in ambienti di transizione (litoranei e deltizi). I primi presentano una porosità tra i granuli (detta primaria) mediamente di circa il 25%, che è saturata dall'acqua proveniente dalle piogge e dall'irrigazione, infiltratasi attraverso gli strati più superficiali.

L'acquifero della Pianura Padana è sostanzialmente costituito da un monostrato di sabbie e ghiaie, localmente compartimentato da livelli lentiformi semipermeabili detti "acquitards", e caratterizzato da un moto delle acque grossomodo parallelo al gradiente topografico, drenante verso il fiume Po. In corrispondenza degli acquitards possono avvenire scambi idrici verticali tra acquiferi sovrapposti dotati di differenti carichi idraulici (fenomeno della drenanza), che si manifestano con movimenti d'acqua ascendenti o discendenti.

Lo spessore di questo complesso di corpi permeabili saturi (acquiferi), dal quale si emunge l'acqua per usi potabili, zootecnici, civili ed industriali, è condizionata dalle strutture del substrato marino in precedenza descritte.

Secondo quanto esposto dall'IRSA10, " *...la coltre alluvionale assume potenze di poche decine di metri lungo gli assi degli alti strutturali (Villanterio, Chignolo Po), mentre raggiunge i 70 - 80 m in corrispondenza degli interposti bassi strutturali (Villanova Sillaro, Ossago). Per quanto attenuate, le predette deformazioni del substrato si ripetono negli strati basali della sequenza continentale. In tutto il sottosuolo della Bassa Lodigiana la litologia dominante delle alluvioni è caratterizzata da ripetute ed irregolari alternanze di strati sabbiosi ed argillosi. A questa regola fanno però eccezione, anche in questo caso, le fasce sviluppatesi ai lati delle aste fluviali attuali e antiche (fiume Adda, fiume Serio e subordinatamente fiume Lambro). Gli acquiferi sotterranei racchiusi in seno ad orizzonti sabbioso-grossolani sono piuttosto modesti - sia come numero che come consistenza - in corrispondenza delle dorsali sepolte di Villanterio-Codogno e di Bascapè-Caviaga. Divengono invece relativamente più cospicui in prossimità dell'Adda.*".

Gli aspetti idrogeologici generali del territorio sono inoltre descritti in un importante studio di ricerca applicata di carattere regionale, che " *...ha permesso di aggiornare in*

---

*modo significativo le conoscenze sulla struttura e sull'evoluzione sedimentaria del bacino alluvionale Padano.”.*

Gli Autori hanno elaborato un modello tridimensionale della struttura interna e dei limiti fisici degli acquiferi Padani lombardi, con l'intento di delimitare gli acquiferi più profondi e maggiormente protetti, di mappare le aree di ricarica diretta degli acquiferi, e di fornire uno strumento utilizzabile per il calcolo dei bilanci delle risorse idriche sotterranee. Gli Autori hanno ritenuto di individuare nella successione sedimentaria lombarda plio-pleistocenica alcune unità idrostratigrafiche di rango superiore denominandole GRUPPI acquiferi A, B, C, D , costituite da complessi di strati con geometrie e caratteri petrofisici variabili, ma depositi in ambienti sedimentari contigui ed in continuità di sedimentazione, definiti a tetto e a letto da barriere impermeabili o semipermeabili di estensione regionale. Conseguentemente i flussi idrici sono prevalentemente paralleli ai limiti dell'unità (ad eccezione delle aree di ricarica diretta), e il livello piezometrico misurabile negli acquiferi presenti in ogni Gruppo è distinto e indipendente da quello degli acquiferi contenuti in altri gruppi in corrispondenza di una medesima verticale. All'interno dei gruppi è possibile distinguere localmente “complessi acquiferi” formati da Sistemi Acquiferi (corpi geologici formati da prevalenti depositi poroso-permeabili), separati da barriere di permeabilità locali e da Sistemi Acquitardi (corpi geologici formati da prevalenti depositi fini scarsamente permeabili). In estrema sintesi, dal punto di vista stratigrafico i gruppi rappresentano uno o più cicli sedimentari compresi tra due fasi trasgressive principali (avanzamento del mare sul continente) che apportano argille marine e sedimenti continentali fini di chiusura del ciclo, mentre per effetto di oscillazioni climatico-eustatiche si producono Sequenze Deposizionali Elementari che costituiscono cicliche alternanze di corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente fine.

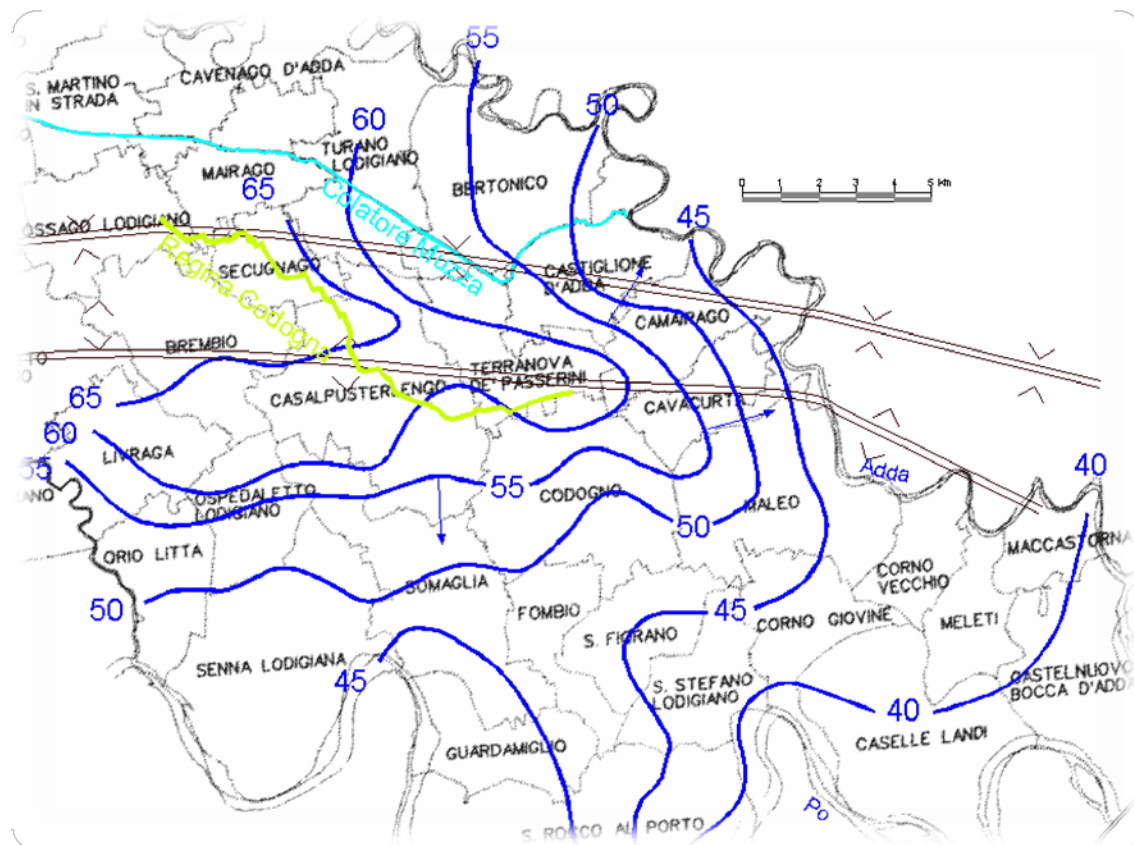
Le opere in intervento riguardano esclusivamente l'acquifero più superficiale, ovvero il Gruppo acquifero A: il gruppo occupa la posizione stratigrafica più elevata e comprende le litologie più grossolane presenti nelle successioni considerate. I caratteri sedimentologici dei depositi paiono connessi a sistemi fluviali ad alta energia conseguenti al deterioramento climatico dei cicli glaciali pleistocenici. Si denota una chiara variazione graduale di facies da nord verso sud, con aumento delle litologie

---

sabbiose a scapito di quelle ghiaiose, e la comparsa nelle posizioni più distali di intercalazioni decimetriche di argilla ed argilla siltosa che determinano confinamenti locali della falda. La profondità del limite basale di tale gruppo è collocabile intorno ai - 50,0 m s.l.m.

### **7.1. Alimentazione e deflusso degli acquiferi**

Il deflusso della falda freatica nel basso lodigiano è caratterizzato dalla presenza di un asse di alimentazione collocato in posizione intermedia fra il Lambro e l'Adda (a nord di Lodi vi è buona corrispondenza con il percorso del canale Muzza), e dal drenaggio esercitato da questi fiumi che scorrono ad una quota inferiore mediamente di circa 15 m rispetto al livello fondamentale della pianura. Il gradiente idraulico medio varia dal 1 al 2 ‰ in direzione NW – SE ma a partire da una distanza di circa 6 Km dall'alveo dell'Adda il deflusso delle acque sotterranee subisce una forte rotazione disponendosi in direzione W – E, perpendicolarmente al corso dell'Adda; tale fenomeno a sud di Castiglione d'Adda risulta particolarmente accentuato e la direzione di deflusso assume un andamento SW – NE, probabilmente in relazione alla presenza di un asse di anticlinale posto in direzione W – E che ha ridotto lo spessore dei depositi quaternari continentali elevando i terreni più antichi caratterizzati da una minore permeabilità.



schema delle isopiezometriche della prima falda nel basso lodigiano. tratto da "IL LAMBRO LODIGIANO E LA SUA VALLE" Consorzio del Lodigiano Febbraio 1994. Sono indicate le principali strutture sepolte indicate in letteratura ed il percorso della roggia Regina Codogna che alimenta numerose derivazioni lungo l'asse centrale del basso lodigiano, e del colatore Muzza che ha costantemente funzione drenante della falda.

Il documento riportato nella Figura, tratto da "Il Lambro lodigiano e la sua valle" del Consorzio del Lodigiano (Febbraio 1994), individua le caratteristiche salienti del campo di moto nel basso lodigiano, che manifestano complesse relazioni con i fiumi principali e le strutture sepolte. Si distingue nella parte centrale una fascia di larghezza di circa 1 Km che costituisce uno spartiacque sotterraneo di importanza locale, che congiunge Brembio con Terranova dei Passerini, passando a nord est di Codogno per poi piegare ed attenuarsi verso SE. Questa struttura separa un flusso prevalentemente da nord a sud, in direzione del fiume Po, che interessa i territori ad ovest e a sud di Codogno, da quello verso est e nord est che interessa i territorio rivieraschi dell'Adda. Lo spartiacque trova buona corrispondenza con la struttura anticlinale passante a tra Brembio e Cavacurta riferita nella cartografia geologica ufficiale (Foglio 60 Piacenza), e con un altro importante fattore di alimentazione della falda, rappresentato dal percorso della roggia Codogna e delle sue derivazioni, schematicamente riferita nella figura precedente. L'area di Castiglione d'Adda secondo tale rappresentazione, è interessata da una falda

---

in direzione SW-NE con gradienti compresi tra l'7,0 ed il 2,5 ‰, che si attenuano entro le alluvioni oloceniche dell'Adda a causa della maggiore permeabilità di questi depositi.

In relazione alla possibile escursione della falda, i dati disponibili per la zona di pianura, in sintesi, descrivono escursioni annue stagionali generalmente modeste, inferiori al metro, ed occasionalmente la possibilità che si manifestino escursioni prossime a 2,0 m. Si conferma infine lo stretto legame delle fluttuazioni con la pratica irrigua.

Per l'area perifluviale dell'Adda sono del assenti dati di livello piezometrico, me è plausibile che il livello sia direttamente connesso con il livello del pelo libero del corso d'acqua.

## **7.2. Permeabilità dei terreni**

La permeabilità dei primi livelli del suolo e del sottosuolo risulta fondamentale nell'influenzare meccanismi di circolazione idrica sotterranea, se non altro per quanto riguarda i rapporti dovuti alle acque di infiltrazione e per valutare la vulnerabilità degli acquiferi, direttamente collegata alle caratteristiche tessiturali del primo sottosuolo.

Dalla composizione granulometrica di un terreno è possibile stimare il coefficiente di permeabilità. Si tratta ovviamente di stime qualitative, in grado di fornire soprattutto un intervallo di valori entro cui può variare il parametro in questione.

La permeabilità maggiore (compresa tra  $10^{-4}$  e  $10^{-2}$  cm/sec) è associata a i terreni prevalentemente sabbiosi che costituiscono il Livello Fondamenta della Pianura ed i Terrazzi dell'Adda. Valori di permeabilità più bassi (compresa tra  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  cm/sec) sono invece associati ai terreni che costituiscono i Paleomeandri del Fiume Adda, caratterizzati da una tessitura superficiale limosa e limoso argillosa.

---

## 8. INDAGINE GEOTECNICA PRELIMINARE

Di seguito si riporta la caratterizzazione dei terreni interessati dall'opera in progetto facendo riferimento alle risultanze dell'indagine geognostica.

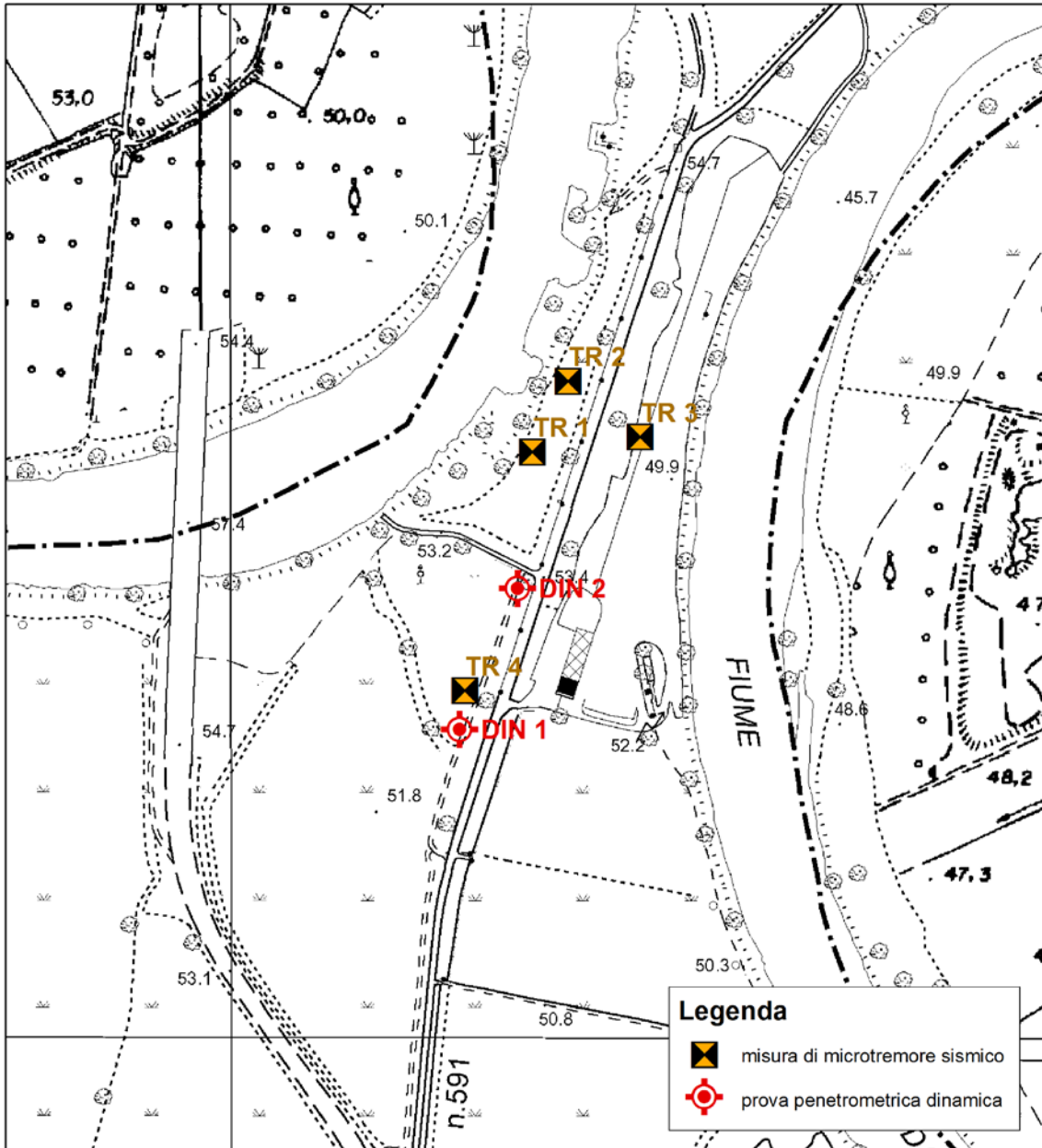
L'indagine è stata effettuata mediante la realizzazione di prove penetrometriche ed indagini sismiche puntuali, che hanno permesso di correlare i dati in tutto l'orno significativo, sia dal punto di vista areale che in profondità.

### Caratteristiche Tecniche-Strumentali Sonda: DPM (DL030 10) (Medium)

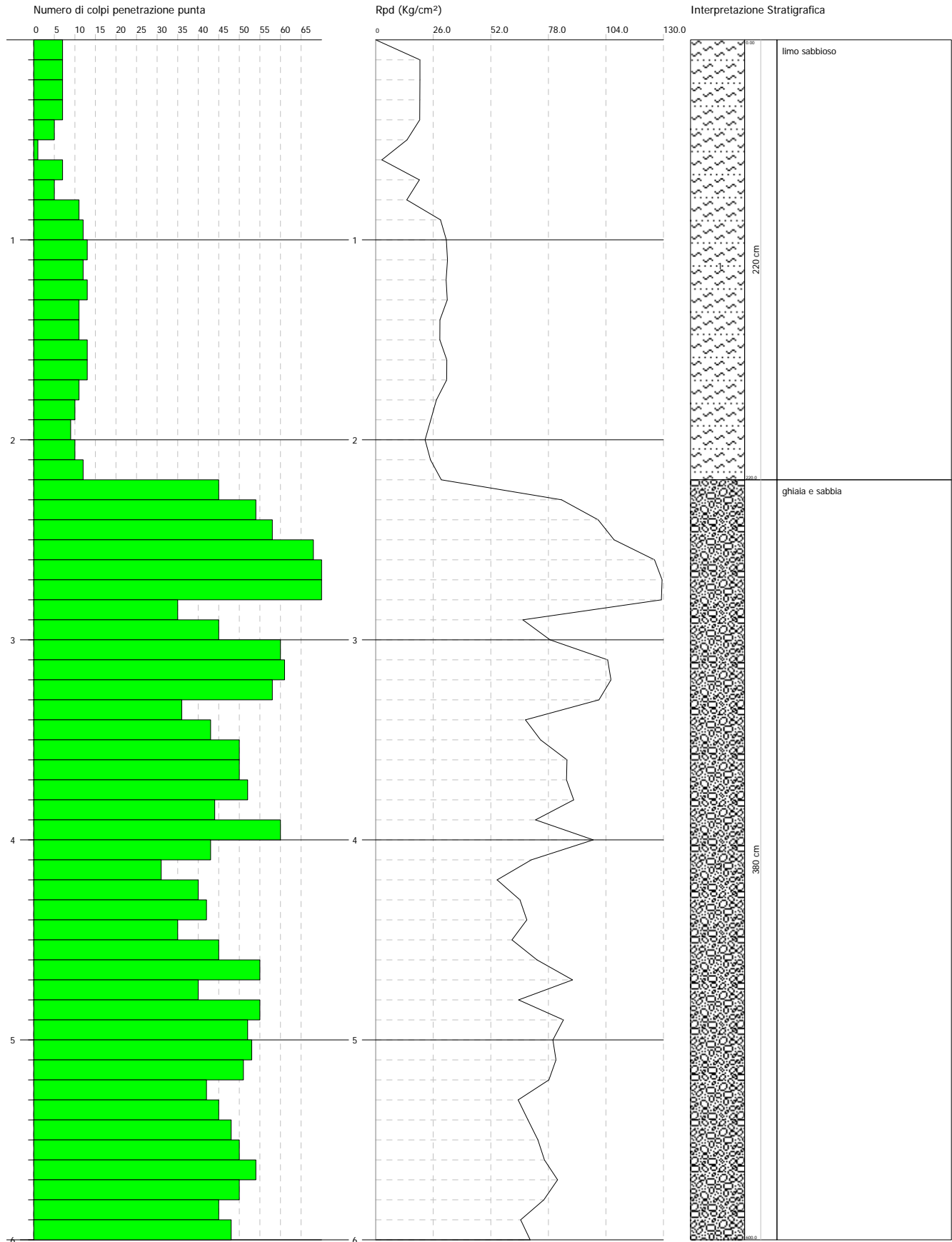
Rif. Norme	DIN 4094
Peso Massa battente	30 Kg
Altezza di caduta libera	0.20 m
Peso sistema di battuta	21 Kg
Diametro punta conica	35.68 mm
Area di base punta	10 cm <sup>2</sup>
Lunghezza delle aste	1 m
Peso aste a metro	2.9 Kg/m
Profondità giunzione prima asta	0.80 m
Avanzamento punta	0.10 m
Numero colpi per punta	N(10)
Coeff. Correlazione	0.761
Rivestimento/fanghi	Si
Angolo di apertura punta	60 °

Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici:

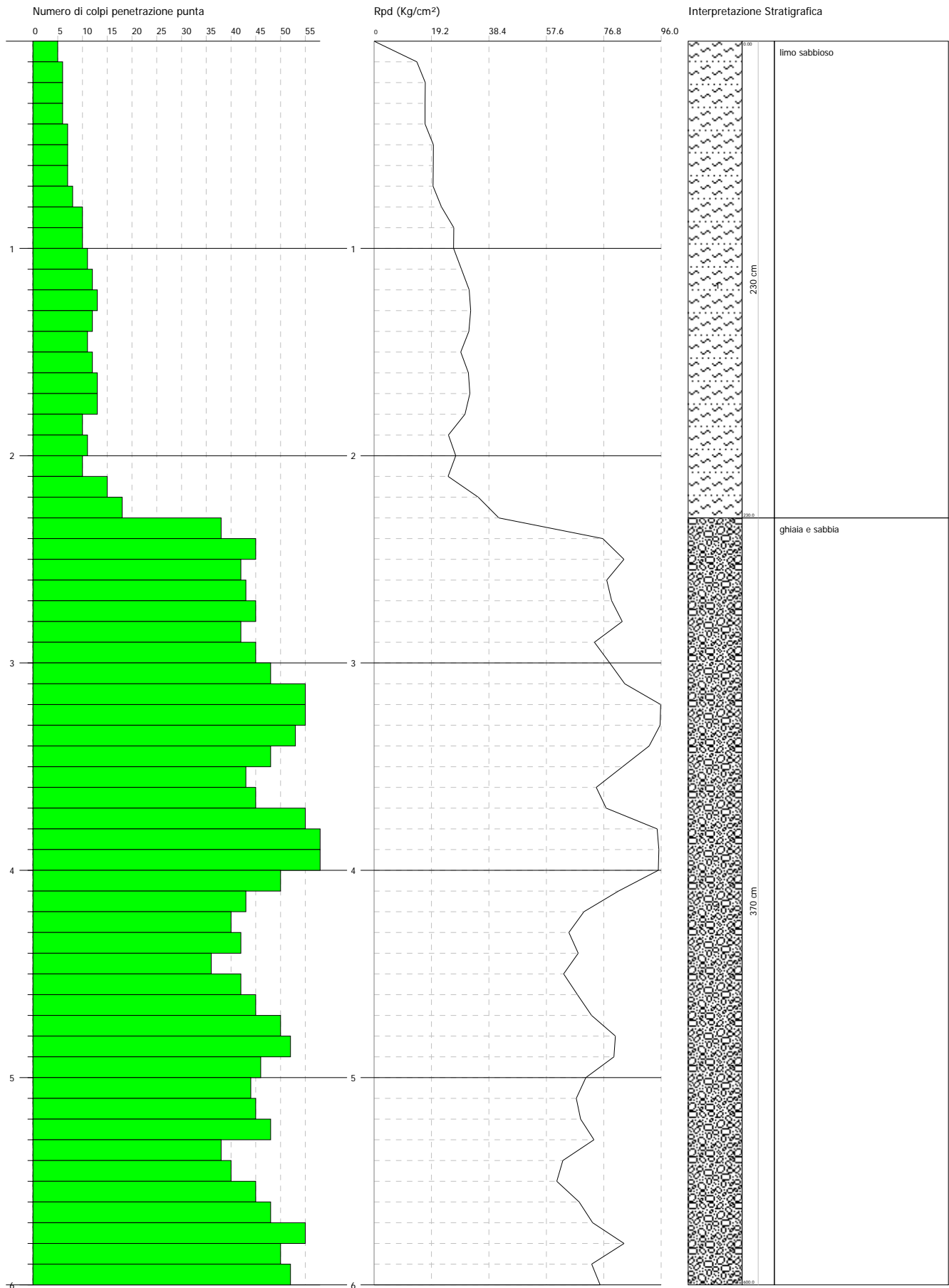
Tipo	Sigla di riferimento	peso della massa M (kg)	prof.max indagine battente (m)
Medio	DPM (Medium)	10<M <40	20-25



Localizzazione indagini geognostiche







---

## 9. ASPETTI GEOTECNICI

Il sottosuolo del settore interessato dagli interventi in oggetto è costituito in generale da sabbie e ghiaie. Considerato l'ambiente posizionale di tipo fluvio-glaciale è comunque verosimile una certa eterogeneità verticale e laterale.

La componente sabbiosa è composta principalmente da granuli di quarzo, feldspati, miche e talora calcari, mentre nei livelli ghiaiosi di ciottoli sono in prevalenza di natura igneo-metamorfica e subordinatamente calcareo dolomitici.

Sul terrazzo dell'Adda in questione si è rilevata la presenza di terreni di copertura sciolti potenti circa due metri, formati in prevalenza da limi e sabbie.

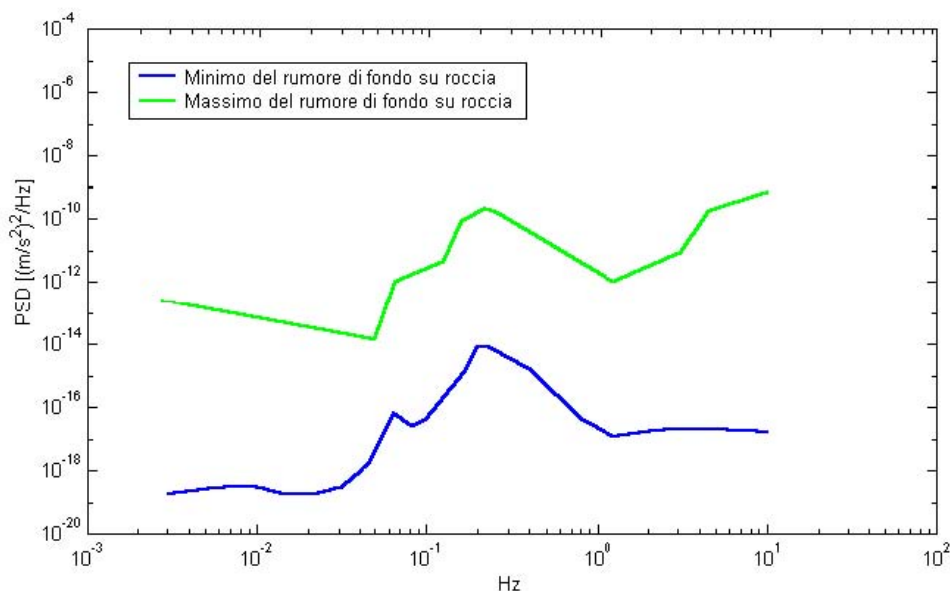
L'esame delle caratteristiche geotecniche è fondato su una campagna preliminare di n°2 prove penetrometriche dinamiche continue SCPT con punta non rivestita.

In questa area le prove CPT mostrano oltre i primi 2-2,50 cm circa un profilo formato da limi sabbioso di media densità ( $31 < \phi' < 33^\circ$ ), poggianti su sabbie e ghiaie dense ( $\phi' > 37^\circ$ ).

---

## 10. INDAGINE GEOFISICA A SISMICA PASSIVA

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato, oltre che dall'attività dinamica terrestre, dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo vicino. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato *ad hoc*, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva. Nelle zone in cui non è presente alcuna sorgente di rumore locale e in assenza di vento, lo spettro in frequenza del rumore di fondo in un terreno roccioso e pianeggiante presenta l'andamento illustrato in Figura 1. A tale andamento generale, che è sempre presente, si sovrappongono le sorgenti locali, antropiche (traffico, industrie o anche il semplice passeggiare di una persona) e naturali che però si attenuano fortemente a frequenze superiori a 20 Hz, a causa dell'assorbimento anelastico originato dall'attrito interno delle rocce.



Modelli standard del rumore sismico massimo e minimo per la Terra secondo il servizio geologico statunitense (USGS). Gli spettri di potenza sono espressi in termini di accelerazione e sono relativi alla componente verticale del moto.

Il tipo di stratigrafia che le tecniche di sismica passiva possono restituire si basa sul concetto di contrasto di impedenza. Per strato si intende cioè un'unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

### 10.1. La tecnica impiegata

La tecnica sismica passiva a stazione singola si è imposta negli anni recenti come il metodo più semplice per verificare se in un sito esista la possibilità di amplificazione

---

per motivi stratigrafici e, se sì, a quali frequenze. Questa prova permette di evidenziare la presenza di amplificazione per risonanze e/o inversioni di velocità significative ai fini della risposta locale, elementi di cui tener conto nella successiva modellazione sismica di sito. Questa prova appare la prima da applicare sia nell'ambito della progettazione che della pianificazione territoriale in quanto dà informazioni immediate sulle criticità del sito e sulle profondità (frequenze) minime a cui bisognerà spingere le successive indagini.

In fase di progettazione, il passo successivo è la determinazione di un profilo di  $V_s$  capace di rendere conto di tutte le risonanze misurate e rilevanti per l'opera in progetto. Poiché per strutture medio-grandi le profondità minime da caratterizzare simicamente (100-200 m per strutture con frequenze proprie di 1 Hz, Figura 6) possono diventare inaffrontabili con la maggior parte delle tecniche geofisiche o in termini di costi, un ragionevole compromesso in questi casi è la determinazione di un profilo di  $V_s$  superficiale tramite una qualsiasi delle tecniche note e l'estensione del profilo di  $V_s$  in profondità tramite il fit vincolato della curva H/V. Pur avendo questo approccio i limiti descritti nel testo, esso appare sufficiente alla successiva eventuale modellazione tramite codici numerici quando il modello di sottosuolo debba essere fornito a grandi profondità. Il modello infatti dovrà comunque riprodurre almeno le stesse frequenze di amplificazione misurate tramite la tecnica sismica passiva a stazione singola.

Va ricordato infine che la tecnica H/V è una delle pochissime tecniche geofisiche che misura direttamente un parametro e non lo deriva da altri fattori: l'informazione sulle frequenze di risonanza del sottosuolo è infatti racchiusa tutta in  $1/V$ , dove  $V$  è lo spettro della componente verticale del moto.

## **10.2. Strumentazione utilizzata e procedura di analisi dati**

Tutte le misure di microtremore ambientale, della durata di circa 20 minuti ciascuna, sono state effettuate con un tromografo digitale progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico. Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, fornito di GPS interno e senza cavi esterni. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

Dalle registrazioni del rumore sismico sono state ricavate le curve H/V, ottenute col software Grilla in dotazione al tromografo TROMINO, secondo la procedura descritta in Castellaro *et al.* (2005), con parametri:

- ⇒larghezza delle finestre d'analisi 20 s,
- ⇒lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale,
- ⇒rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine / media a lungo termine) superiore ad 2,
- ⇒rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti.

Come già accennato, nei casi particolarmente semplici (copertura + bedrock) la profondità  $h$  della discontinuità sismica viene ricavata tramite la formula semplice della

---

risonanza o, al più, tramite la formula [1] in cui  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato,  $x$  un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.) e  $f_r$  la frequenza fondamentale di risonanza (cf. ad esempio Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

$$H = \left[ \frac{V_0(1-x)}{4f_r} + 1 \right]^{\frac{1}{1-x}} + 1 \quad [1]$$

Nei casi multistrato più complessi le curve H/V si invertono invece creando una serie di modelli sintetici, da confrontare con quello sperimentale, fino a considerare per buono il modello teorico più vicino alle curve sperimentali

### 10.3. Valutazione delle misure. Il progetto Sesame

Negli ultimi anni un progetto europeo denominato SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) si è occupato di stabilire linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola ed in array. Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSR e la significatività dei picchi H/V eventualmente trovati. Per ogni sito di misura riportiamo in una apposita tabella i risultati di detti criteri. Si vedrà che tutte le misure HVSR effettuate sono buone, secondo i criteri SESAME, mentre non tutti i picchi trovati sono significativamente importanti ai fini della microzonazione sismica. Che questo accada è normale, in funzione della geologia del sito.

## 11. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione dei dati sismici è stata realizzata mediante TROMINO®, dotato di:

- 3 canali velocimetrici per l'acquisizione del microtremore sismico ambientale (fino a  $\pm 1.5$  mm/s ~)
- 3 canali velocimetrici per la registrazione di vibrazioni forti (fino a  $\pm 5$  cm/s ~)
- 3 canali accelerometrici per monitoraggio di vibrazioni
- 1 canale analogico (es. trigger esterno per MASW/rifrazione)
- ricevitore GPS integrato, antenna interna e/o esterna per localizzazione e/o sincronizzazione tra diverse unità
- modulo radio per sincronizzazione tra diverse unità e trasmissione di allarmi (es. superamento di soglie)

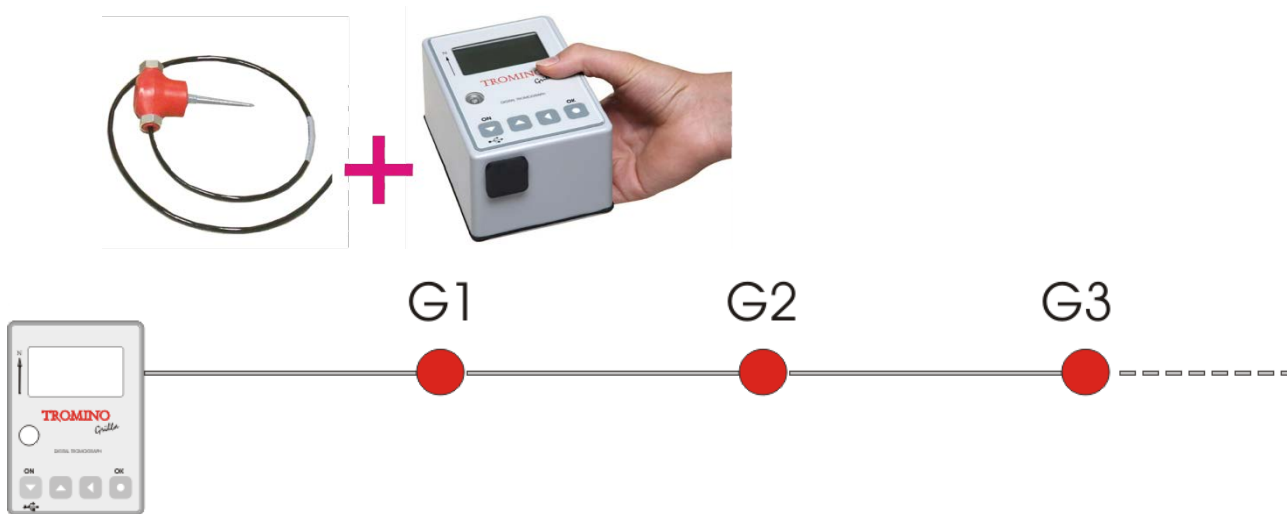
TROMINO® opera nell'intervallo di frequenze 0.1 - 1024 Hz su tutti canali (fino a 32 kHz su 2 canali) con conversione A/D > 24 bit equivalenti a 128 Hz.

---

### 11.1. Cenni teorici sulla curva di dispersione da indagine pseudo-MASW

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

La curva di dispersione ottenuta elaborando i dati derivanti dalle indagini sismiche col metodo SWM (surface waves multichannel) è una curva apparente derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione, e che per i limiti indotti dal campionamento non necessariamente coincide con singoli modi nei diversi intervalli di frequenza campionati.



Esempio di dispiegamento del sistema TROMINO® - cavo trigger con geofono. I punti di energizzazione coincidono con G1, G2, G3...

L'indagine di tipo SASW / MASW viene effettuata dal software *Grilla* all'interno del modulo Dispersion curves.

---

## 12. ANALISI DELLE MISURE DEL MICROTREMORE SISMICO PASSIVO ED ATTIVO

L'indagine è stata svolta eseguendo n°4 misure di microtremore sismico ambientale a stazione singola. Il report dettagliato delle misure è riportato in allegato.

Tali indagini sono state svolte col fine di valutare la continuità delle litologie di superficie anche più in profondità, data l'impossibilità di raggiungere tali livelli di interesse applicativo con le indagini dirette a causa della notevole consistenza delle litologie stesse.

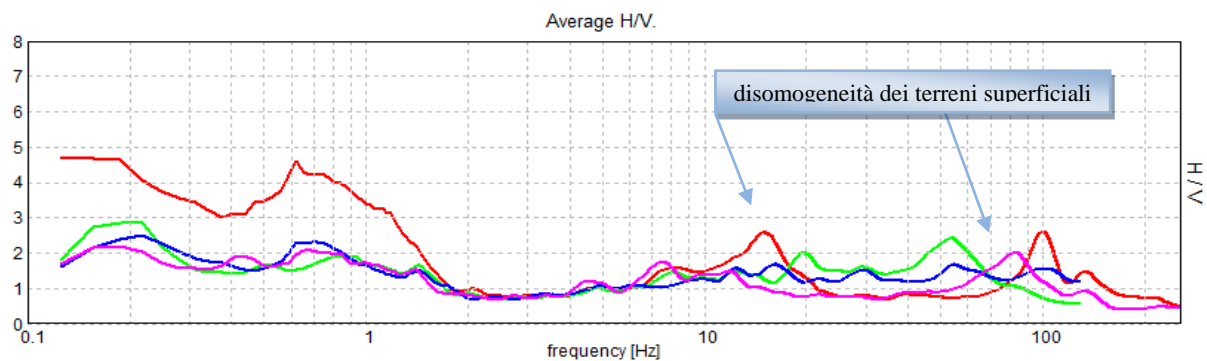
Si è inoltre focalizzata l'attenzione più in profondità al fine di fornire indicazioni degli strati più in profondità.

Tutte le prove hanno un andamento generale molto simile, le uniche differenze sono riconducibili a disomogeneità dei terreni più superficiali,

Nelle prove, la curva H/V mostra dei picchi in alta frequenza; l'analisi degli spettri singoli mette chiaramente in evidenza che si tratta di picchi di natura stratigrafica causati da una sensibile differenza di competenza. Più in profondità si osserva che le litologie hanno caratteristiche sismiche piuttosto uniformi.

Dal punto di vista applicativo i picchi a più alta frequenza sono totalmente trascurabili in quanto sono causati dai primi orizzonti di potenza compresa tra .5-2,5 m.

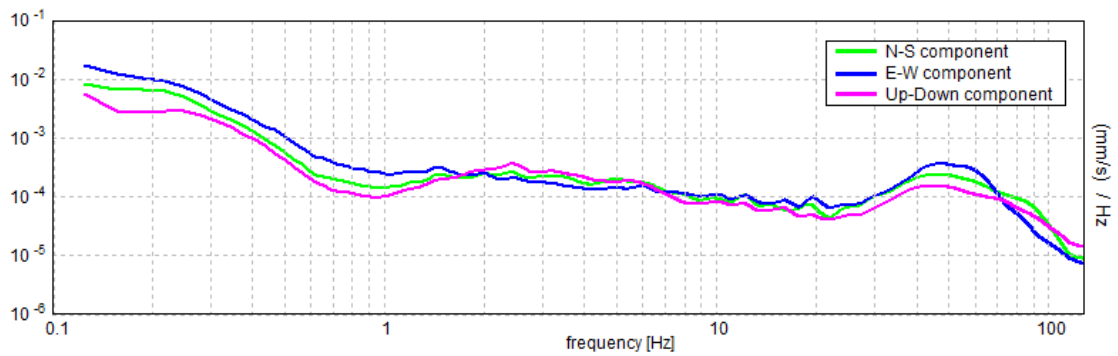
Il picco principale è prodotto dalla presenza dei terreni più competenti di substrato.



sovrapposizione delle curve H/V

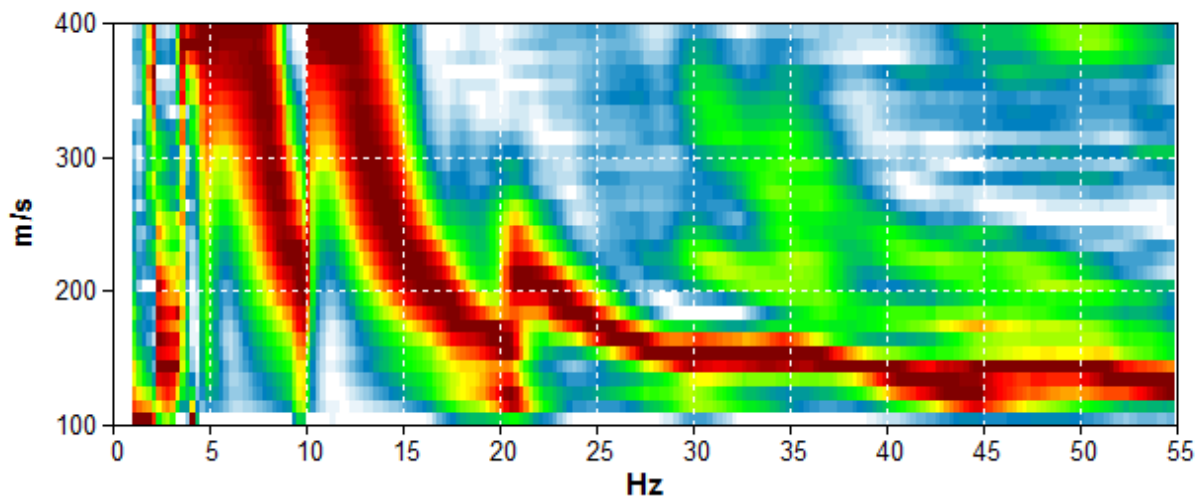
Col grafico degli “SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI” è possibile valutare un eventuale inversione di velocità sismica nei terreni. Tale caratteristica risulta evidente quando la curva delle componenti verticali (Up-Down) si mantiene stabilmente al di sopra delle componenti verticali.

Nel caso in esame si rileva una debole inversione di velocità nel range 2-4,5 Hz



curva degli spettri delle singole componenti

Il *fit* vincolato della curva H/V per produrre profili di Vs e stima del Vs30 è basato su onde di superficie (Rayleigh e Love) a partire da modelli di sottosuolo inseriti dall'utente in prima ipotesi e successivamente congiunto alla *CURVA DI DISPERSIONE* degli spettri di velocità di fase delle onde di superficie proveniente da indagini in array attive di tipo SASW (e cioè MASW usando un solo canale per volta).



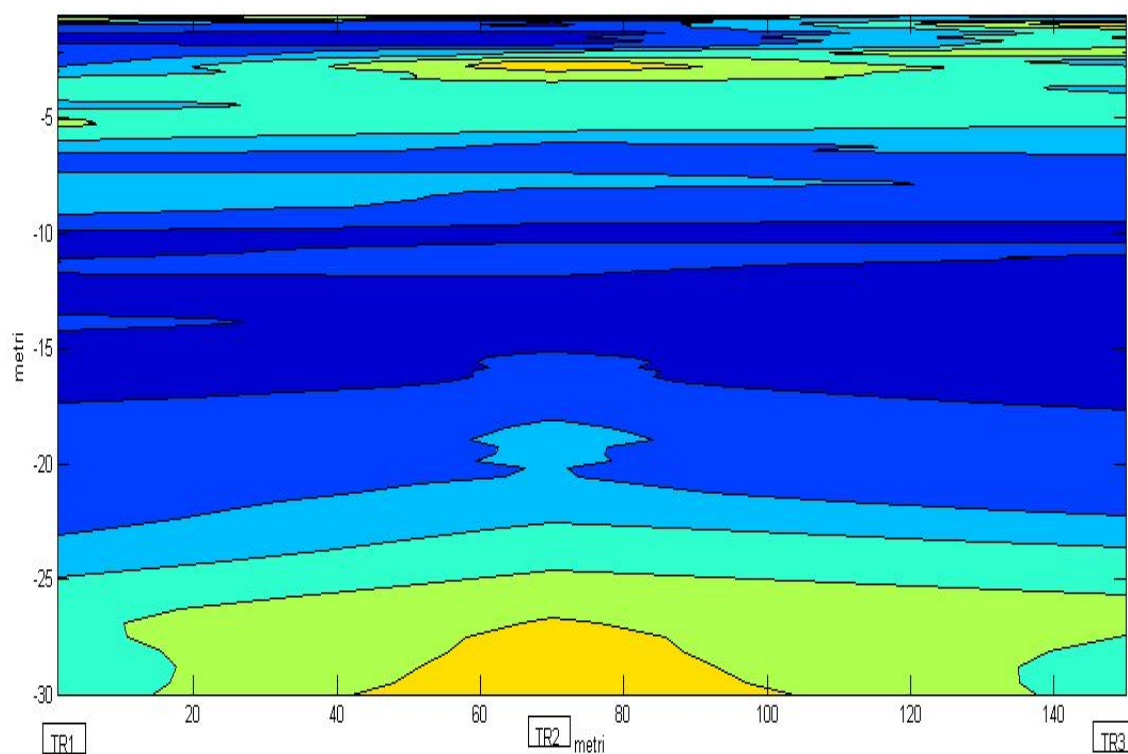
report dell'indagine SAWS *MODELLED RAYLEIGH WAVE PHASE VELOCITY DISPERSION CURVE*

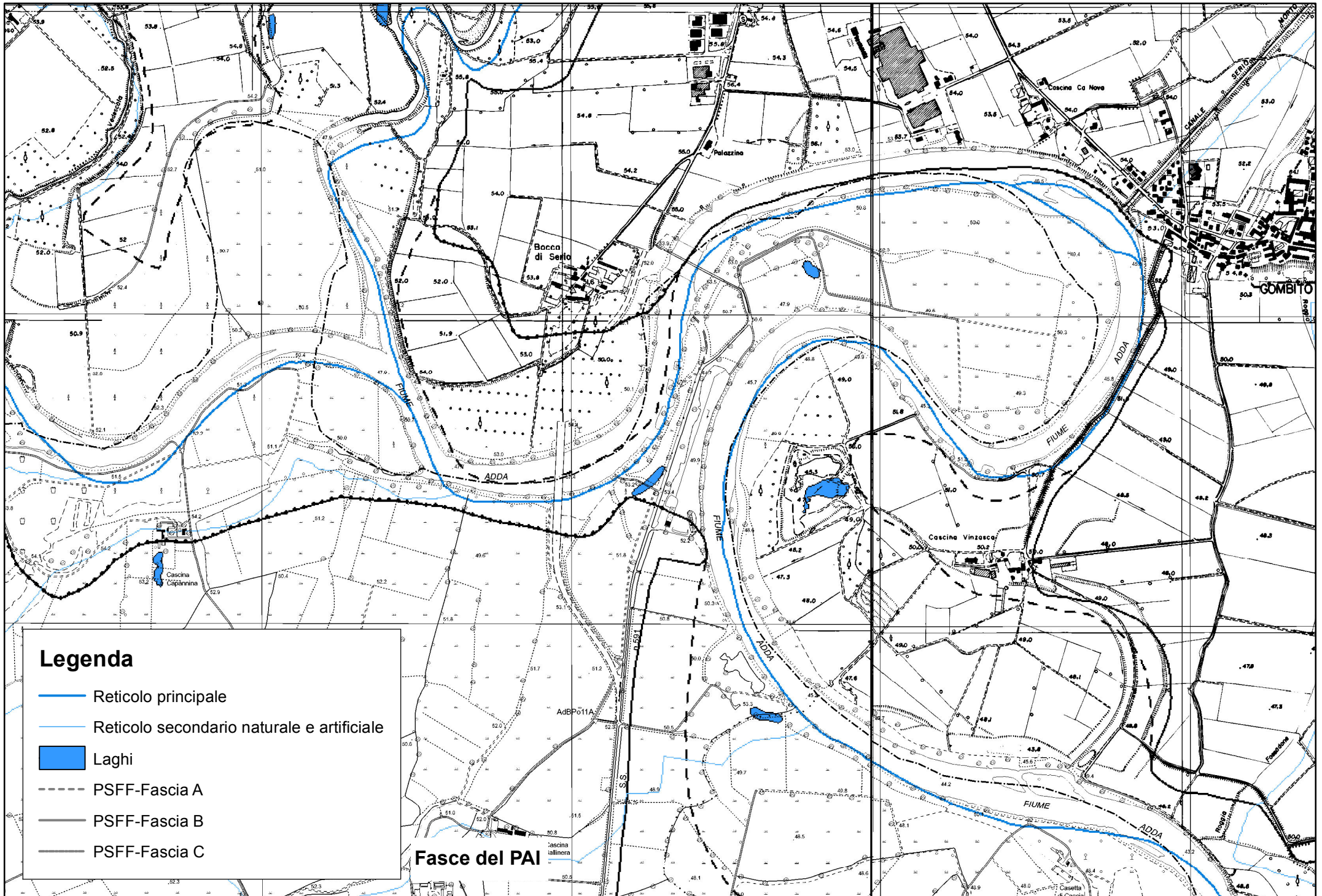


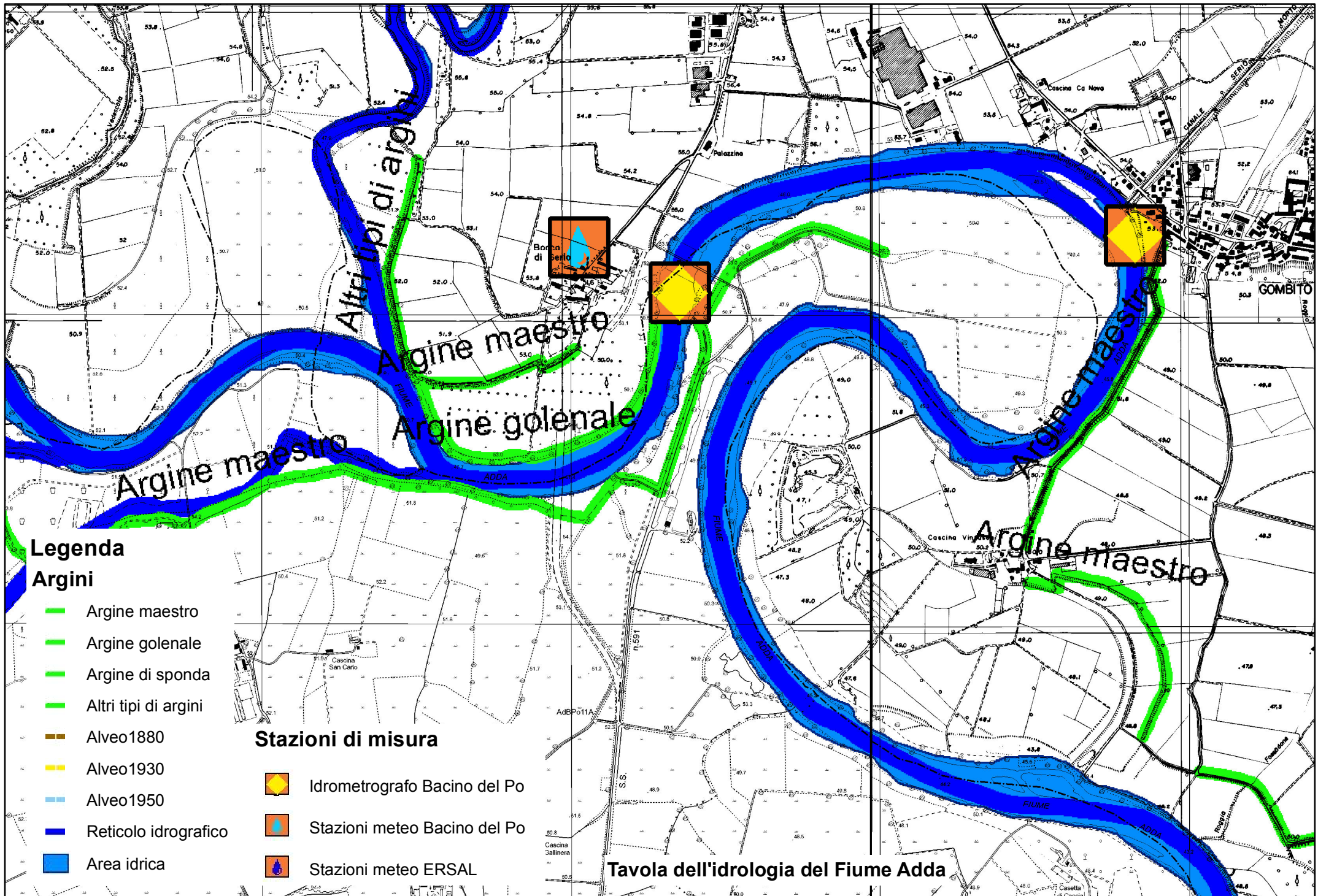
---

Di seguito si presenta inoltre una pseudo-sezione tracciata a scopo indicativo tra i punti di misura TR1-TR2-TR3, che permette di evidenziare come i terreni di substrato nel settore in esame siano piuttosto omogenei.

Va ricordato che le sezioni interpretative mostrano una suddivisione ricostruita essenzialmente sul differente stato di competenza dei materiali investigati. È quindi possibile che il passaggio da una unità all'altra non corrisponda necessariamente ad un passaggio litologico netto.







**Legenda**

**Argini**

- Argine maestro
- Argine golenale
- Argine di sponda
- Altri tipi di argini

**Alveo**

- Alveo1880
- Alveo1930
- Alveo1950

**Reticolo idrografico**



- Area idrica

**Stazioni di misura**

- Idrometrografo Bacino del Po
- Stazioni meteo Bacino del Po
- Stazioni meteo ERSAL

**Tavola dell'idrologia del Fiume Adda**

# Legenda

-  Piana di esondazione
-  alveo abbandonato

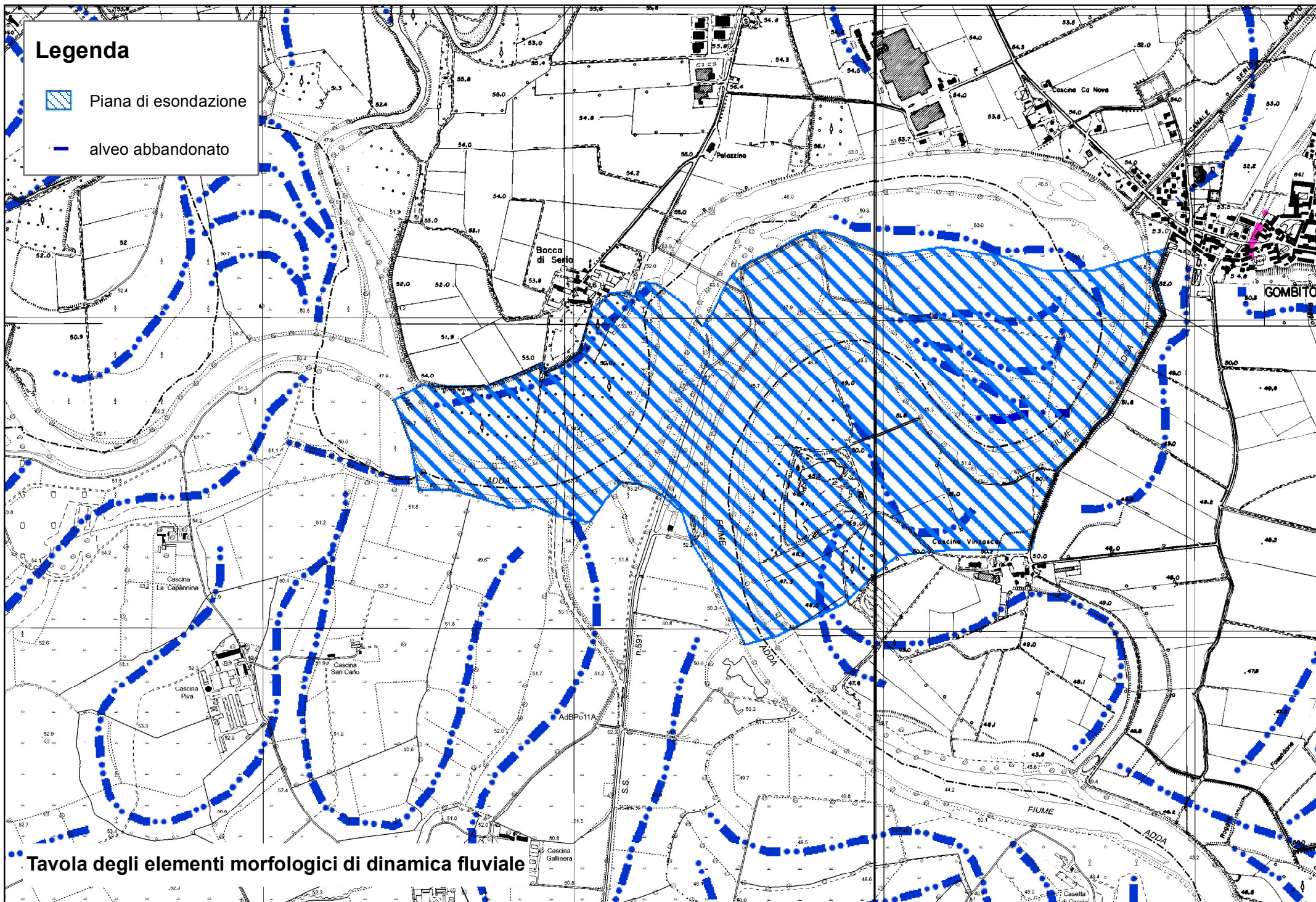
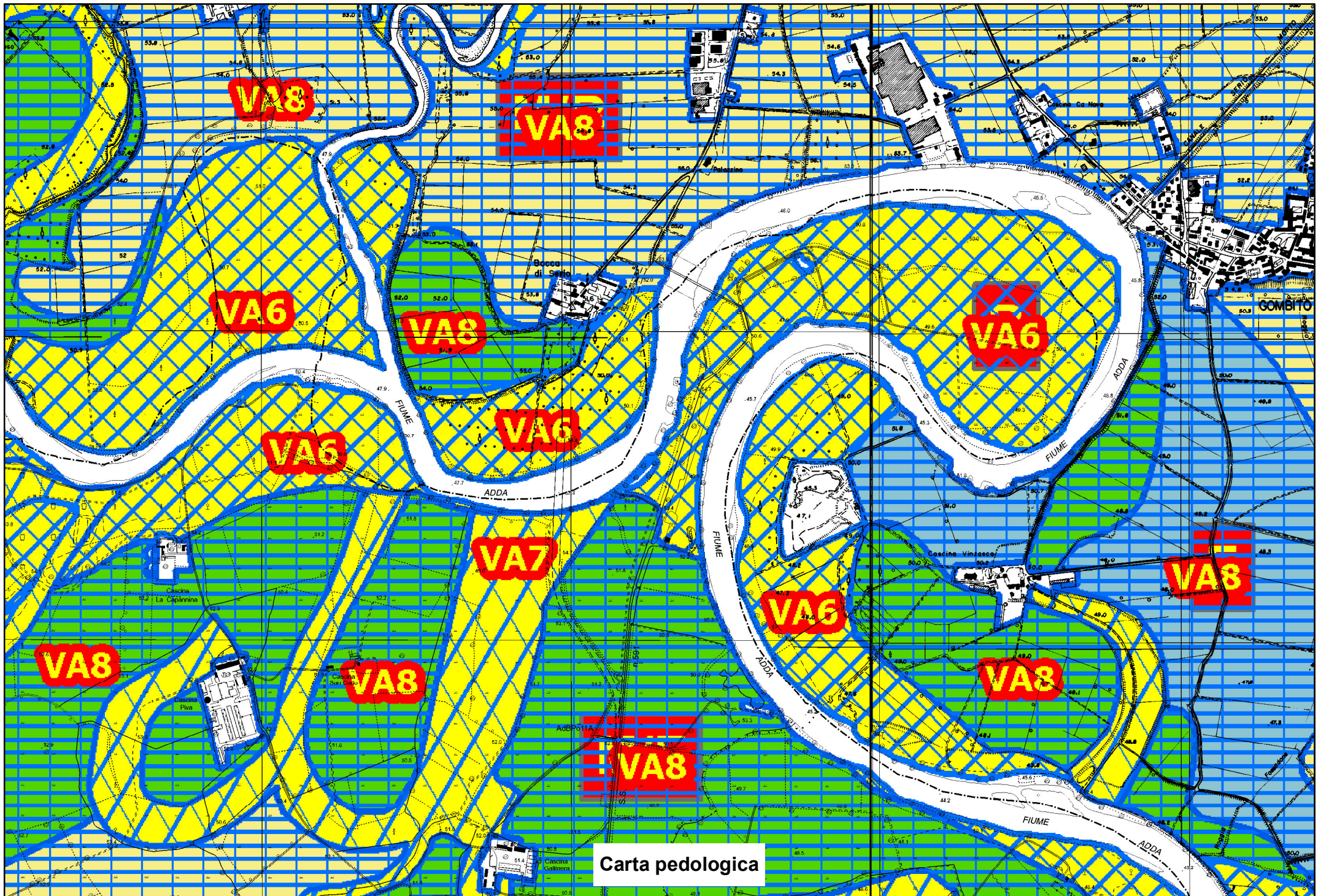


Tavola degli elementi morfologici di dinamica fluviale



Carta pedologica

**TR1**

Strumento: TEN-0024/01-07

Inizio registrazione: 08/02/12 15:27:24 Fine registrazione: 08/02/12 15:36:37

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; TRIG+ TRIG-

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h09'12". Analizzato 85% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 512 Hz

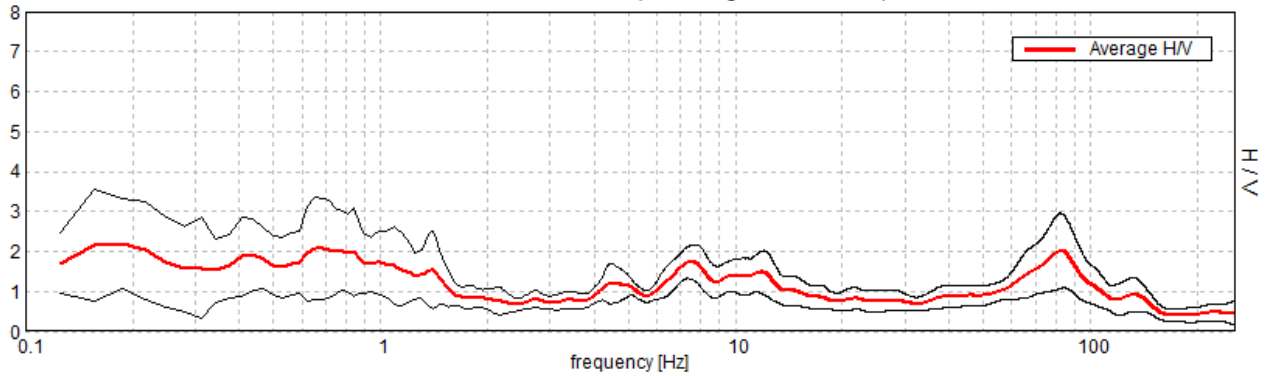
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

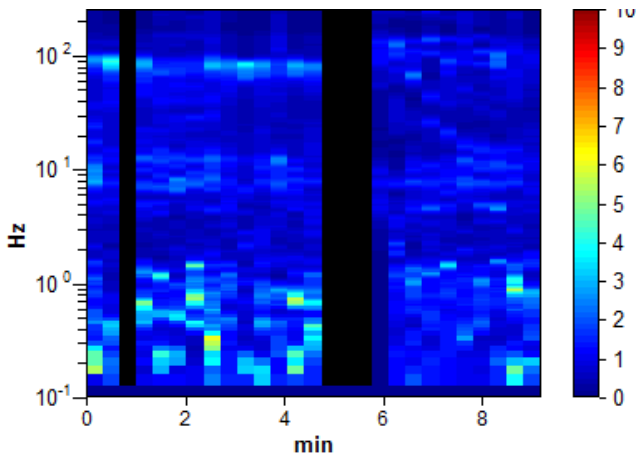
Lisciamento: 10%

**RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**

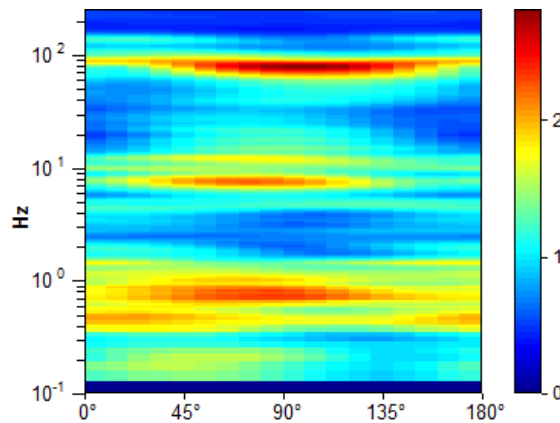
Max. H/V at 0.19 ± 25.16 Hz. (In the range 0.0 - 256.0 Hz).



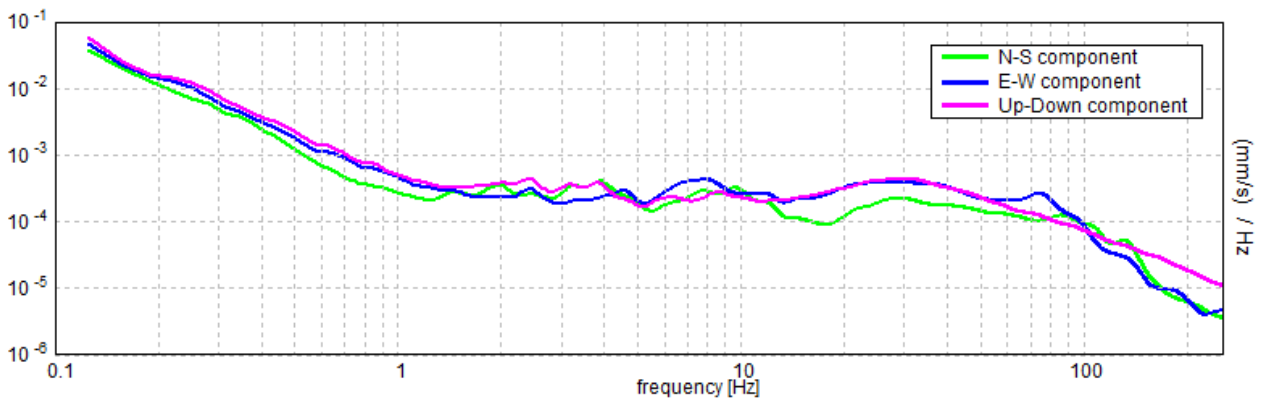
**SERIE TEMPORALE H/V**



**DIREZIONALITA' H/V**



**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**



**TR2**

Strumento: TEN-0024/01-07

Inizio registrazione: 08/02/12 15:38:21 Fine registrazione: 08/02/12 15:52:58

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; TRIG+ TRIG-

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h14'36".

Analizzato 79% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 512 Hz

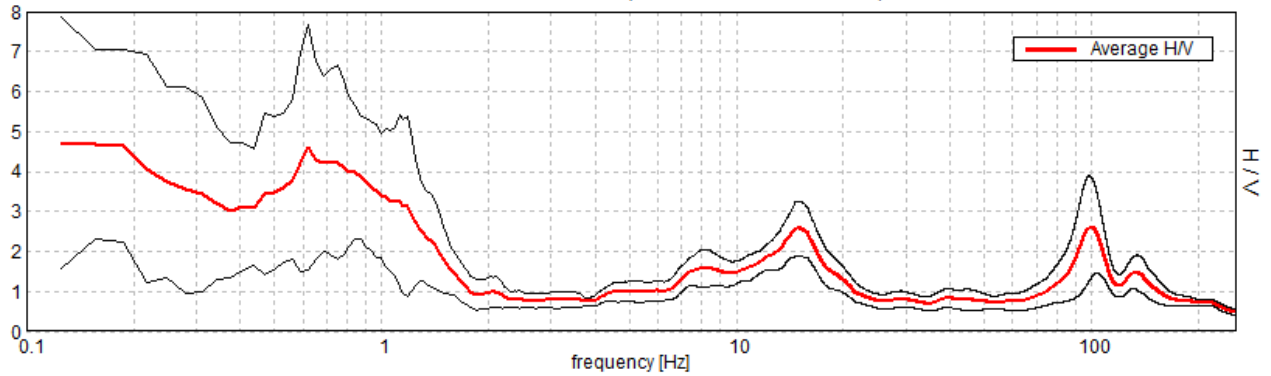
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

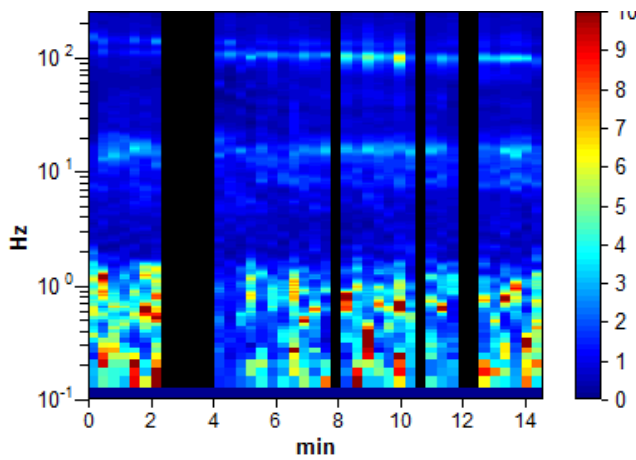
Lisciamento: 10%

**RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**

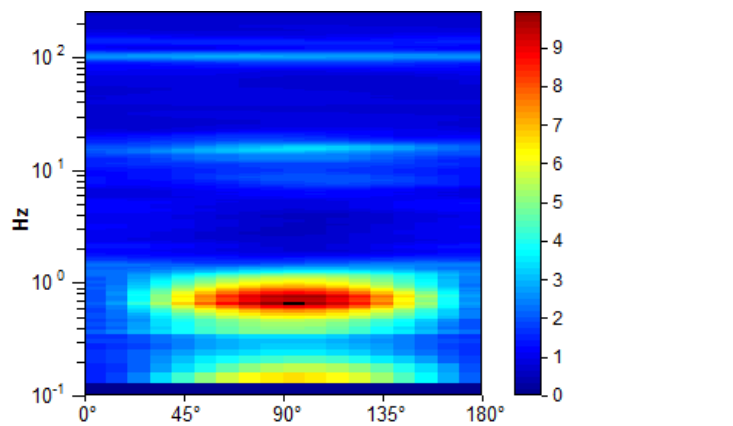
Picco H/V a  $0.13 \pm 0.14$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 256.0 Hz).



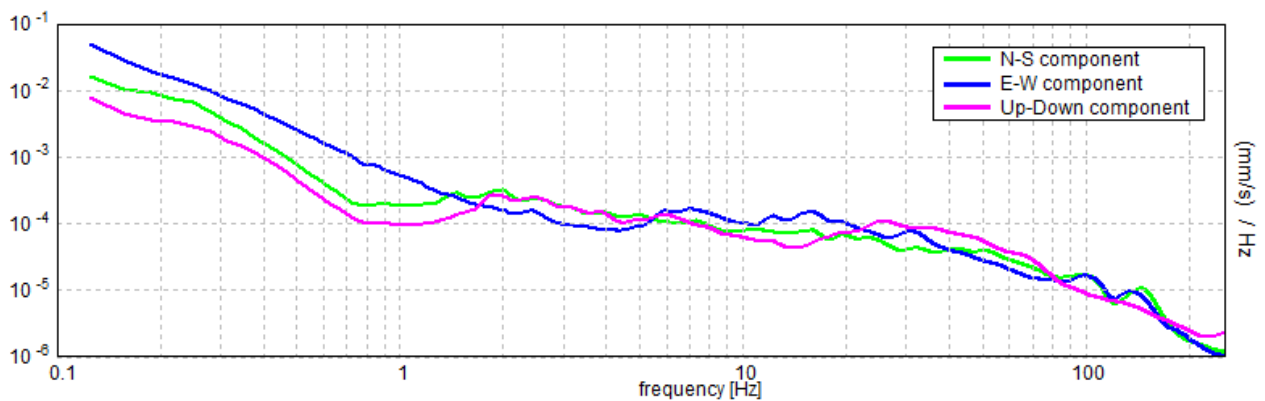
**SERIE TEMPORALE H/V**



**DIREZIONALITA' H/V**



**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**



### TR3

Strumento: TEN-0024/01-07

Inizio registrazione: 08/02/12 15:57:05 Fine registrazione: 08/02/12 16:16:20

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN; TRIG+ TRIG-

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h19'12".

Analisi effettuata sull'intera traccia.

Freq. campionamento: 256 Hz

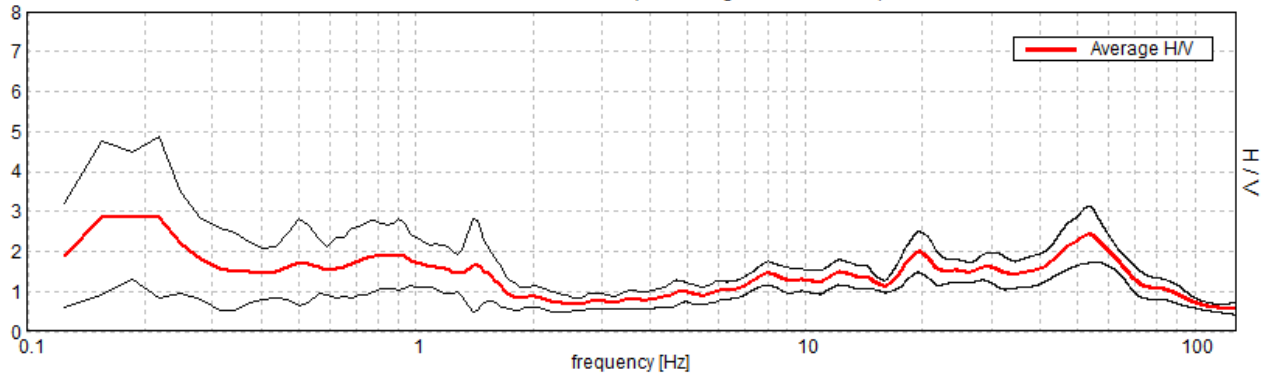
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

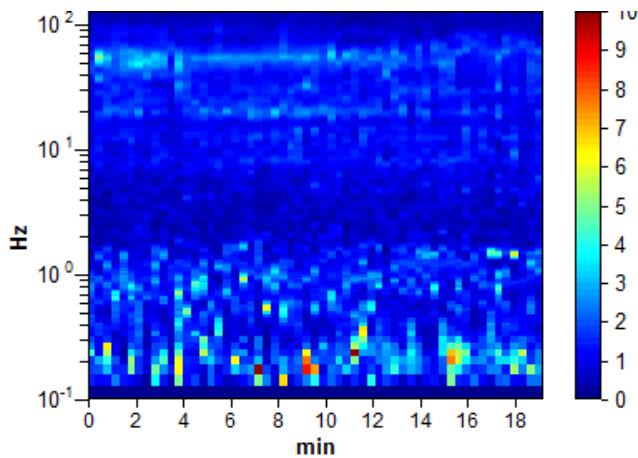
Lisciamento: 10%

### RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

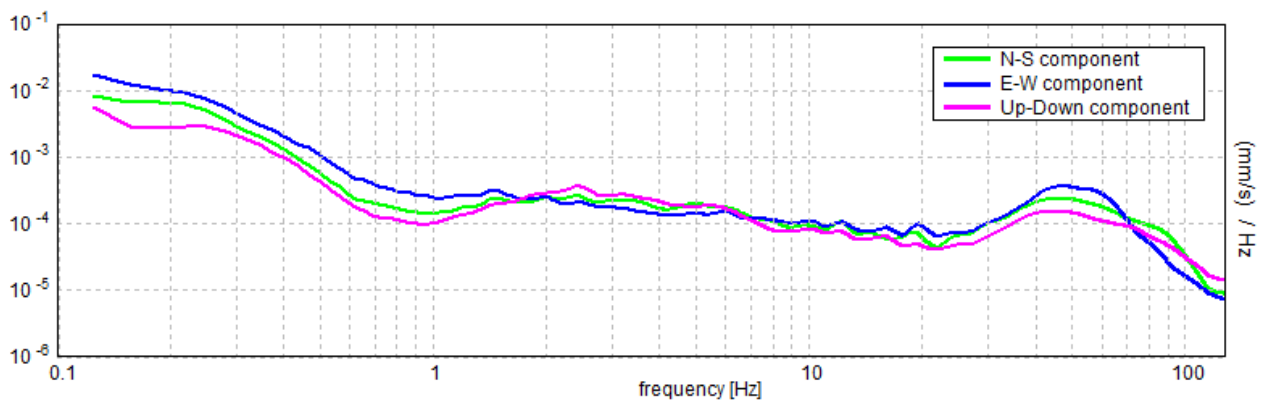
Max. H/V at  $0.19 \pm 8.98$  Hz. (In the range 0.0 - 128.0 Hz).



### SERIE TEMPORALE H/V



### SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI





**TR4**

Strumento: TEN-0024/01-07

Inizio registrazione: 08/02/12 16:32:29 Fine registrazione: 08/02/12 17:18:22

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN ; TRIG+ TRIG-

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h45'48". Analizzato 36% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 256 Hz

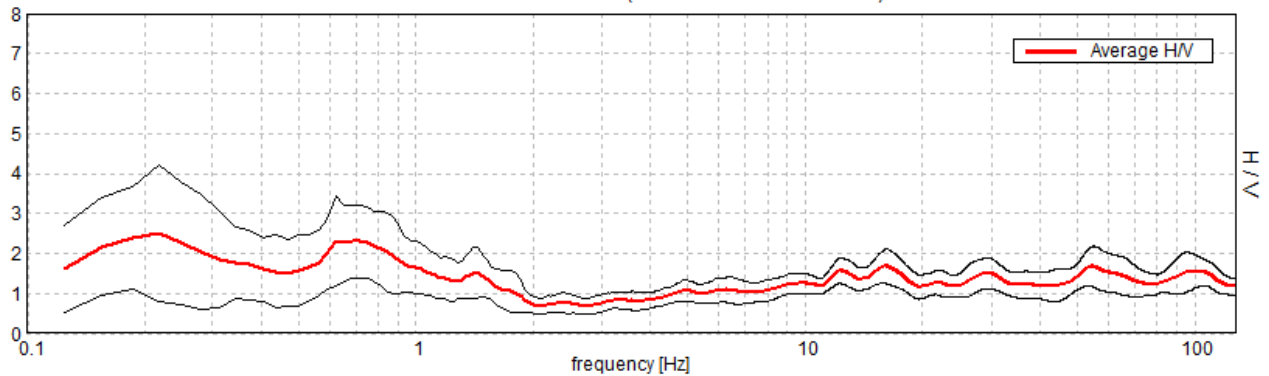
Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

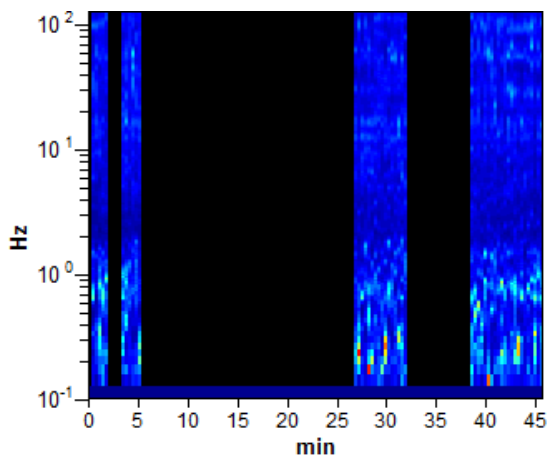
Lisciamento: 10%

**RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE**

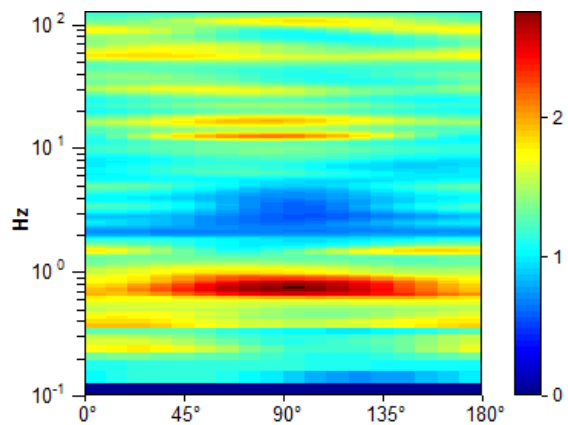
Picco H/V a  $0.22 \pm 0.06$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 128.0 Hz).



**SERIE TEMPORALE H/V**



**DIREZIONALITA' H/V**



**SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI**

