



Università degli Studi di Ferrara
Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra
via Saragat, 1 - I-44122 Ferrara - Italy
segreteria: 0532.974724 - fax: 0532.974767 - P.IVA: IT 00434690384 - C.F.: 80007370382

Microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino

Relazione illustrativa

Convenzione di Ricerca 2013-2015

Università degli Studi di Ferrara – Comune di Sant'Agostino (FE)



Ferrara, 2 settembre, 2014



<i>Coordinamento dello studio di Microzonazione Sismica:</i>	<i>Prof. Riccardo Caputo</i>
<i>Redazione della relazione</i>	<i>Dott.ssa Ambra Mantovani</i> <i>Prof. Riccardo Caputo</i>
<i>Creazione database dei dati geotecnici e geofisici:</i>	<i>Dott.ssa Ambra Mantovani</i> <i>Dott. Luca Minarelli</i>
<i>Realizzazione indagini geofisiche:</i>	<i>Dott.ssa Ambra Mantovani</i> <i>Dott. Nasser Abu-Zeid</i> <i>Prof. Riccardo Caputo</i> <i>Dott. Geol. Gabriele Tarabusi</i>
<i>Analisi pericolosità di liquefazione</i>	<i>Dott.ssa Ambra Mantovani</i> <i>Prof. Riccardo Caputo</i> <i>Dott. Geol. Gabriele Tarabusi</i>
<i>Elaborazione tavole cartografiche:</i>	<i>Dott.ssa Ambra Mantovani</i> <i>Prof. Riccardo Caputo</i> <i>Prof. Marco Stefani</i> <i>Dott. Luca Minarelli</i>
<i>Mappatura effetti di sito</i>	<i>Prof. Riccardo Caputo</i> <i>Dott. George Papathanassiou</i> <i>Dott. Luca Minarelli</i> <i>GdL liquefazioni RER-DPC</i>



Indice

Premessa	5
Parte Prima - Generalità	7
1. Inquadramento geologico e geodinamico	9
2. Neotettonica e sismicità	19
2.1. Sorgenti sismogeniche	20
2.2. Storia sismica di Sant'Agostino	22
2.3. Paleoliquefazioni	26
3. La sequenza sismica del maggio 2012	31
3.1. Effetti superficiali secondari	33
3.2. Effetti di amplificazione locale	35
Parte Seconda - Indagini	39
4. Indagini geotecniche	41
4.1. Prove penetrometriche statiche	42
4.2. Sondaggi	46
5. Indagini geofisiche	49
5.1. Penetrometrie statiche SCPTu	53
5.2. Indagini MASW	54
5.3. Indagini <i>cross-hole</i>	57
5.4. Indagini sismiche passive in <i>array</i> ESAC	58
5.5. Indagini HVSR	60
6. Raccolta dati per lo studio	65
6.1. Archivio preesistente	66
6.2. Ricerca dati da archivi	69
6.3. Digitalizzazione prove penetrometriche	72
6.4. Raccolta nuovi dati geofisici	75
6.5. Sintesi dati disponibili	83



Parte Terza - Analisi dei dati	87
7. Geologia di superficie	89
7.1. Carta geologica dei sedimenti affioranti	90
7.2. Carta geotecnica dei depositi superficiali	97
7.3. Potenziale di liquefazione	101
8. Carta delle MOPS	119
8.1. Livello grafico: effetti secondari	120
8.2. Livello grafico: fattore di amplificazione	121
8.3. Livello grafico: potenziale di liquefazione	123
9. Considerazioni conclusive	129
Riferimenti bibliografici	131

Allegato A

Schede tecniche indagini penetrometriche

Allegato B

Misure di rumore ambientale a stazione singola

Allegato C

Indice del Potenziale di Liquefazione

Allegato D

Tavole grafiche



Premessa

Scopo della microzonazione sismica (MS) è la caratterizzazione del territorio in base alla risposta sismica locale, cioè al comportamento dei terreni durante un evento sismico, individuando e delimitando le aree a comportamento omogeneo, distinguendo tra zone stabili, zone suscettibili di amplificazioni del moto sismico e zone soggette a instabilità, quali frane, fratturazioni superficiali e liquefazioni.

La microzonazione sismica, suddividendo il territorio in aree a diversa pericolosità sismica, costituisce uno strumento di prevenzione e riduzione del rischio sismico particolarmente efficace, oltre che un supporto fondamentale agli strumenti di pianificazione comunale per indirizzare le scelte urbanistiche verso le aree a minore pericolosità.

Il presente studio di microzonazione sismica è stato realizzato nell'ambito di una convenzione di ricerca stipulata tra l'Amministrazione del Comune di Sant'Agostino e l'allora Dipartimento di Scienze della Terra (successivamente diventato Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra) dell'Università degli Studi di Ferrara. Tale convenzione della durata triennale (2013-2015) ha come scopo il co-finanziamento di una borsa di studio di dottorato dedicata al progetto "Effetti geologici superficiali del terremoto emiliano 2012: studi finalizzati al miglioramento della sicurezza e sostenibilità dello sviluppo territoriale".

Le attività di microzonazione previste nell'ambito di tale dottorato sono state svolte in modo complementare e sinergico a quelle che la Regione Emilia Romagna ha effettuato ai sensi dell'ordinanza n. 70/2012 ("Approvazione programma per gli studi microzonazione sismica") dedicata ai territori più danneggiati dai sismi del 20 e 29 maggio tra cui compare anche il Comune di Sant'Agostino, i cui risultati sono disponibili nel sito web <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/speciale-terremoto/sisma-2012-ordinanza-70-13-11-2012-cartografia>. Il lavoro è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato B del medesimo documento ("Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica, redazione degli elaborati e archiviazione dei dati, nei comuni colpiti dai terremoti del 20 e 29 maggio 2012 in cui sono stati osservati effetti di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 6$ "). Per quanto non specificato nel suddetto documento, il



riferimento tecnico per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione degli elaborati grafici richiesti è rappresentato dagli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" approvati con Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112/2007 (da qui in avanti "indirizzi regionali" o DAL 112/2007) e dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (Gruppo di lavoro MS, 2008) approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (da qui in avanti "ICMS") e da quanto descritto nella Relazione Illustrativa dello studio di MS di cui all'ordinanza n. 70/2012.

Grazie alla suddetta convenzione questo studio ha interessato l'intero territorio comunale e non soltanto gli ambiti territoriali indicati nell'Allegato A dell'Ordinanza 70/2012.

I documenti prodotti dal presente studio sono costituiti da cinque volumi: una Relazione illustrativa e quattro allegati.

La Relazione illustrativa contiene la parte descrittiva di tutto il lavoro svolto ed è suddivisa in tre parti; la prima concerne l'inquadramento dell'area di studio da un punto di vista geologico, tettonico e geomorfologico; la seconda parte illustra i dati raccolti, i criteri e le procedure di analisi; la terza parte, infine, descrive i risultati delle indagini e delle elaborazioni e riporta una sintesi dello studio.

L'Allegato A ("Schede tecniche ed analisi penetrometrie") contiene i) alcune specifiche tecniche relative all'interpretazione delle penetrometrie e le schede in formato grafico di tutte le indagini comprese nella banca dati e ii) le procedure semplificate per la stima del potenziale di liquefazione con i relativi grafici per tutti i punti di misura.

L'Allegato B ("Misure di rumore ambientale a stazione singola") contiene le generalità sulla procedura di calcolo per l'elaborazione delle misure di rumore ambientale a stazione singola (HVSr) ed i rapporti tecnici in formato grafico e tabellare per tutte le prove effettuate.

L'Allegato C ("Indice del Potenziale di Liquefazione") contiene le generalità sulla procedura di calcolo dell'Indice del Potenziale di Liquefazione ed i grafici relativi a tutte le penetrometrie disponibili.

L'Allegato D ("Tavole cartografiche"), infine, contiene i principali risultati delle diverse indagini effettuate sintetizzati in una serie di tavole cartografiche (tutte alla scala 1:10.000).



Parte prima

-

Generalità



1. Inquadramento geologico e geodinamico

Dal punto di vista strutturale la Pianura Padana coincide in larga misura con un bacino tettonico di avanfossa formatosi in conseguenza della convergenza e della collisione tra placca Europea (blocco Sardo-Corso) ed Adriatica (Boccaletti e Guazzone, 1974; Principi e Treves, 1984) che hanno portato alla creazione delle Alpi Meridionali e dell'Appennino Settentrionale (Figura 1). In particolare, la catena appenninica ha iniziato a formarsi a partire dal Miocene superiore (11.6 Ma), attraverso una serie di intense fasi deformative che hanno causato la sovrapposizione di varie unità tettoniche parzialmente o totalmente scollate dal proprio basamento. Queste unità affiorano largamente nei rilievi dell'Appennino Settentrionale.

Se da un lato, il contatto tra i depositi alluvionali quaternari e le successioni pre-quaternarie esposte nei rilievi collinari coincide con i limiti fisiografici della Pianura Padana,

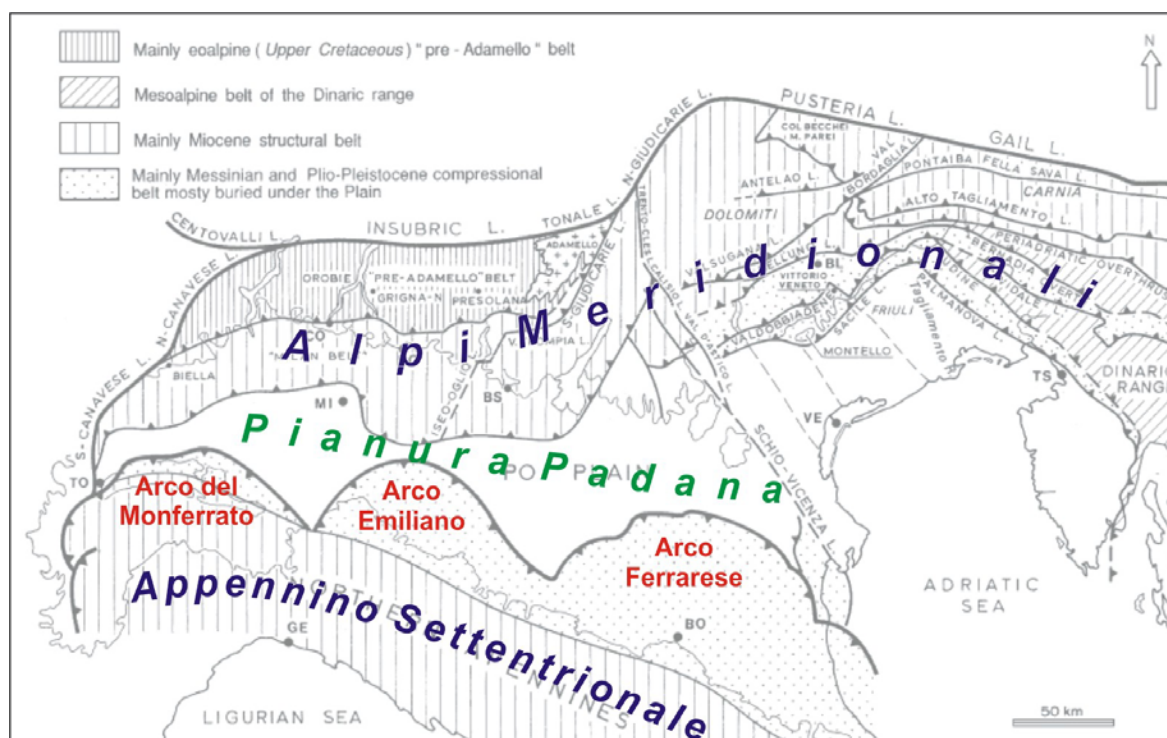


Figura 1 - Relazioni tra Alpi Meridionali, Pianura Padana ed Appennino Settentrionale. I tre archi principali sepolti dalle coltri sedimentarie dell'avanfossa padana rappresentano i fronti tettonici più avanzati della catena appenninica tuttora in formazione. Da Castellarin *et al.*, 2006.

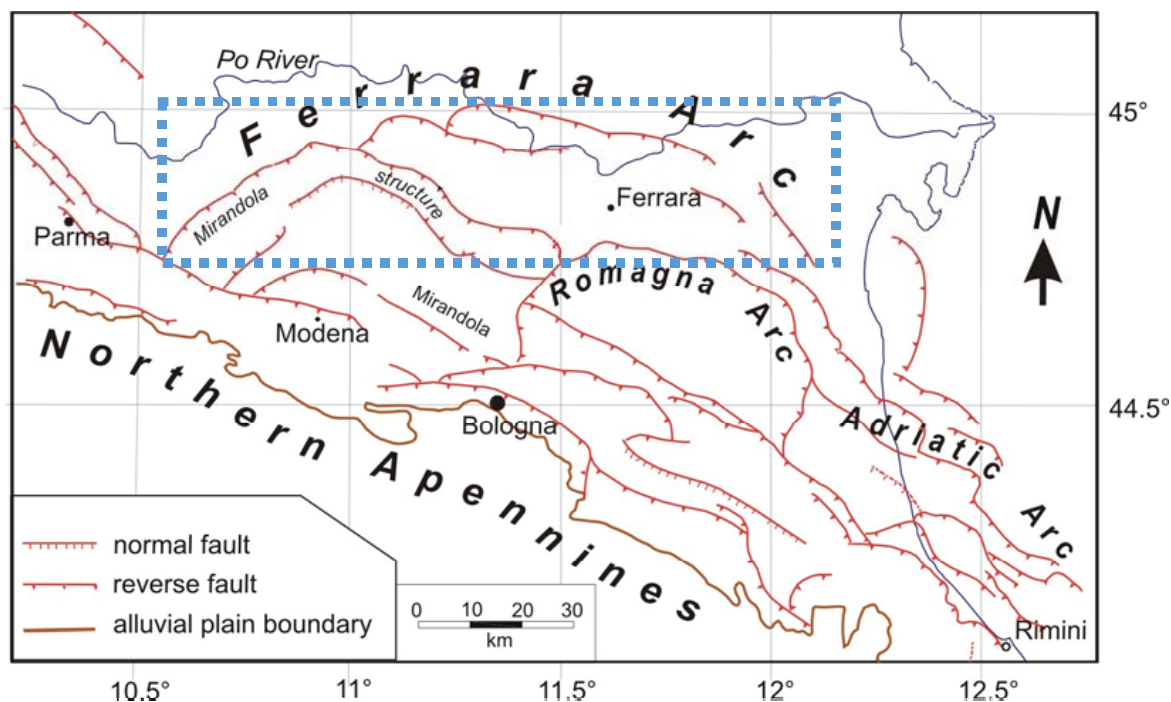


Figura 2 - L'Arco Ferrarese è costituito da diverse strutture tettoniche minori con dimensioni caratteristiche di 10-30 km. La maggior parte di esse sono certamente sismogeniche anche se soltanto alcune sono state riattivate in tempi storici.

da un punto di vista tettonico il vero fronte della deformazione appenninica risulta molto più avanzato verso nord e coinvolge praticamente tutte le successioni sedimentarie presenti nel sottosuolo del settore meridionale della Pianura Padana (Figura 2). Tali strutture tettoniche si sono principalmente sviluppate durante il Pliocene ed il Quaternario in modo simile a quelle meridionali affioranti in catena ma, a causa dei forti tassi di sedimentazione che caratterizzano la Pianura Padana, esse risultano completamente sepolte. I numerosi profili sismici effettuati in tutta l'area padana per le ricerche di idrocarburi hanno permesso di riconoscere nel sottosuolo la presenza di una serie di faglie e pieghe associate, dalla geometria arcuata se osservate in pianta, e prevalentemente con vergenza settentrionale. I fronti più avanzati coinvolgono anche la piattaforma carbonatica padano-veneta, appartenente al dominio adriatico, che tende a sottoscorrere verso sud (Pieri e Groppi, 1981).

L'intero fronte appenninico sepolto è caratterizzato da tre complessi sistemi di faglie e sovrascorrimenti nord-vergenti. Da ovest ad est, si riconoscono l'Arco del Monferrato, l'Arco Emiliano e l'Arco Ferrarese (Figure 1 e 2).

L'evento tettonico più importante che ha interessato il margine appenninico-padano risale al tardo Pliocene inferiore (4.5-3.9 Ma), successivo alla crisi di salinità del Messiniano



inferiore e precedente al definitivo sollevamento della catena appenninica nel Pleistocene inferiore-medio. Durante questa fase si verifica la messa in posto di una spessa coltre di sedimenti clastici, da facies prevalentemente fini di piattaforma e scarpata a facies più eterogenee con intervalli detritici grossolani.

A partire dal Pliocene medio (3.8-3.9 Ma) si verifica una modificazione sostanziale della geometria del bacino di avanfossa. Il fronte della deformazione, infatti, si trasferisce verso NE e si attivano gli attuali archi sepolti della pianura (Figura 2), per cui la sedimentazione marina si concentra in più depocentri distinti.

Dalla fine del Pleistocene inferiore e fino al Pleistocene medio (1.1-0.6 Ma) il continuo sollevamento dell'intero orogeno provoca, a partire dal settore occidentale del bacino, la progressiva regressione marina e quindi l'instaurarsi di ambienti marini sempre meno profondi, ma è soltanto nel Pleistocene medio che il continuo sollevamento causa il definitivo instaurarsi di una sedimentazione continentale. In questo contesto, i massimi spessori si accumulano all'interno dei bacini satellite (cosiddetti bacini *piggy-back*) che si stavano sviluppando sulle falde tettoniche in movimento verso NE. E' sempre in questa fase che inizia a depositarsi il Supersistema Emiliano-Romagnolo (*SERS*; RER & ENI-Agip, 1998), costituito dai depositi alluvionali del Fiume Po e dei suoi principali affluenti appenninici (Boccaletti *et al.*, 2004).

A titolo esemplificativo, sono di seguito descritte alcune sezioni geologiche, ricavate dall'interpretazione di profili sismici, che offrono una breve panoramica sull'assetto attuale del sottosuolo del settore orientale della Pianura Padana.

Il profilo geologico A-A' in Figura 3 si estende tra Modena e Mirandola. Esso mostra due strutture tettoniche principali entrambe sepolte. Quella meridionale coincide con l'estremità orientale dell'Arco Emiliano, mentre quella settentrionale fa parte delle Pieghe Ferraresi. Tali strutture sono impostate sulle unità torbiditiche mioceniche (M in Figura 3). Al di sotto di Modena si trovano una serie di sovrascorrimenti e faglie inverse posti tra 2 e 6 km di profondità, mentre tra la città e le Pieghe Ferraresi si riconosce un'ampia depressione, nota come bacino di Carpi-Cento (Serva, 1990), colmata da una coltre di depositi post-messiniani spesso alcuni km dove le torbiditi mioceniche generano una sinforme asimmetrica. Nel caso delle Pieghe Ferraresi, invece, la tettonica compressiva ha originato un'alto strutturale associato ad una piega per propagazione di faglia (anticlinale di Mirandola) la cui geometria tridimensionale è controllata da alcune faglie sia sintetiche che antitetiche.

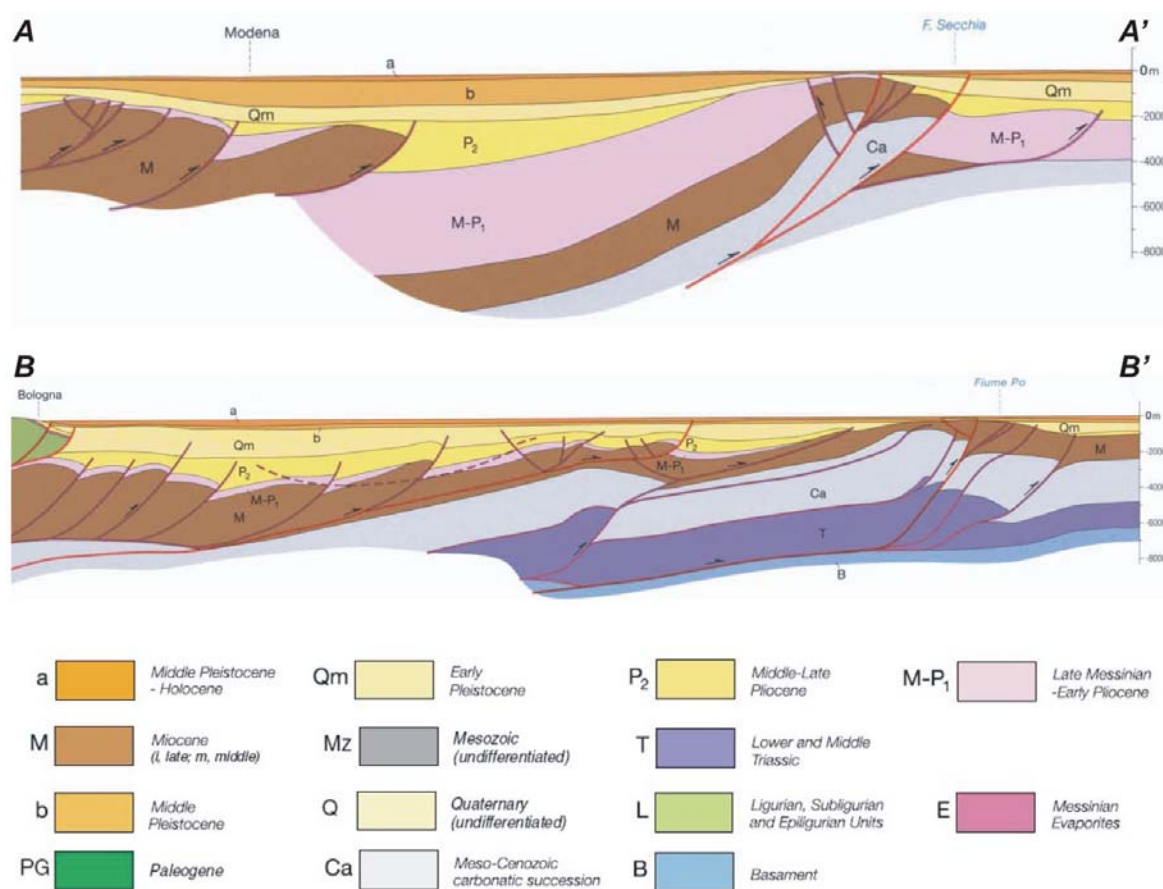


Figura 3 - Esempi di sezioni geologiche profonde interpretate sulla base di indagini di sismica a riflessione. Il profilo A-A' mostra la struttura di Mirandola causativa del terremoto del 20 maggio 2012, mentre il profilo B-B' mostra la struttura di Casaglia probabilmente associata alla sequenza sismica che ha colpito Ferrara nel 1570.

La sezione geologica B-B' in Figura 3 si estende tra Bologna e il Fiume Po evidenziando il progressivo assottigliamento delle torbiditi mioceniche verso le Pieghe Ferraresi. In questo settore, il substrato roccioso costituito da depositi pelagici e di piattaforma carbonatica meso-cenozoici risulta tettonicamente sollevato fino quasi alla superficie topografica così come i livelli triassici ed il sottostante basamento crostale, che si trova a meno di 10 km di profondità. Dal punto di vista strutturale, i principali sovrascorrimenti interessano le successioni triassiche e meso-cenozoiche, propagandosi chiaramente fino alle torbiditi mioceniche.

Il risultato della complessa evoluzione delle strutture sepolte si riflette nel differente spessore (da parecchie centinaia a poche decine di metri in corrispondenza delle anticlinali

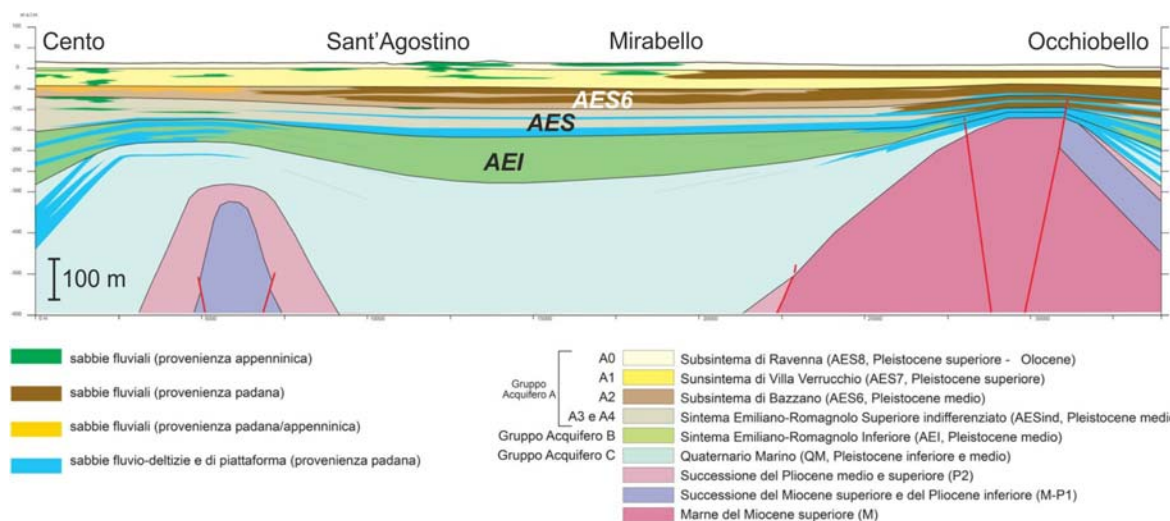


Figura 4 - Profilo geologico tra Cento ed Occhiobello (Luca Martelli, RER, comunicazione personale) che mostra le forti variazioni di spessore delle unità alluvionali quaternarie indotte dalla presenza di strutture anticlinaliche e sinclinaliche.

sepolte; Bigi *et al.*, 1992) e nella deformazione della coltre sedimentaria pliocenico-quaternaria che ha progressivamente colmato il Bacino Padano.

La sezione geologica in Figura 4, che si estende in direzione SW-NE tra gli abitati di Cento e Occhiobello, mostra come la profondità della base della successione alluvionale (Sistema Emiliano-Romagnolo Inferiore – AEI, Pleistocene medio) dipenda dalla presenza delle strutture anticlinaliche e sinclinaliche che formano le Pieghe Ferraresi. Ad esempio, nella sinclinale Carpi-Cento (a sud di Figura 4) lo spessore delle alluvioni supera i 500 m, mentre in corrispondenza dell'anticlinale di Canaglia, nei pressi di Occhiobello, si riduce a meno di 100 m (RER & ENI-Agip, 1998).

L'attività tettonica recente delle strutture in questione è quindi chiaramente responsabile della deformazione della coltre sedimentaria superficiale, come è stato dimostrato da Abu-Zeid *et al.* (2012). Nell'ambito di questo lavoro è stato ricostruito il profilo della velocità delle onde di taglio nel sottosuolo, lungo un transetto compreso tra i comuni di Cento e di Bondeno (Figura 5). A tal fine, sono stati acquisiti numerosi profili di velocità 1D mediante tecniche ESAC e Re.Mi. (ved. Capitolo 5), che hanno permesso di investigare il sottosuolo fino a circa 150 m di profondità. I risultati ottenuti mostrano delle variazioni nel gradiente verticale di velocità delle onde di taglio ascrivibili ad un tasso di sedimentazione lateralmente variabile ed al conseguente diverso grado di addensamento dei sedimenti tardo-quaternari.

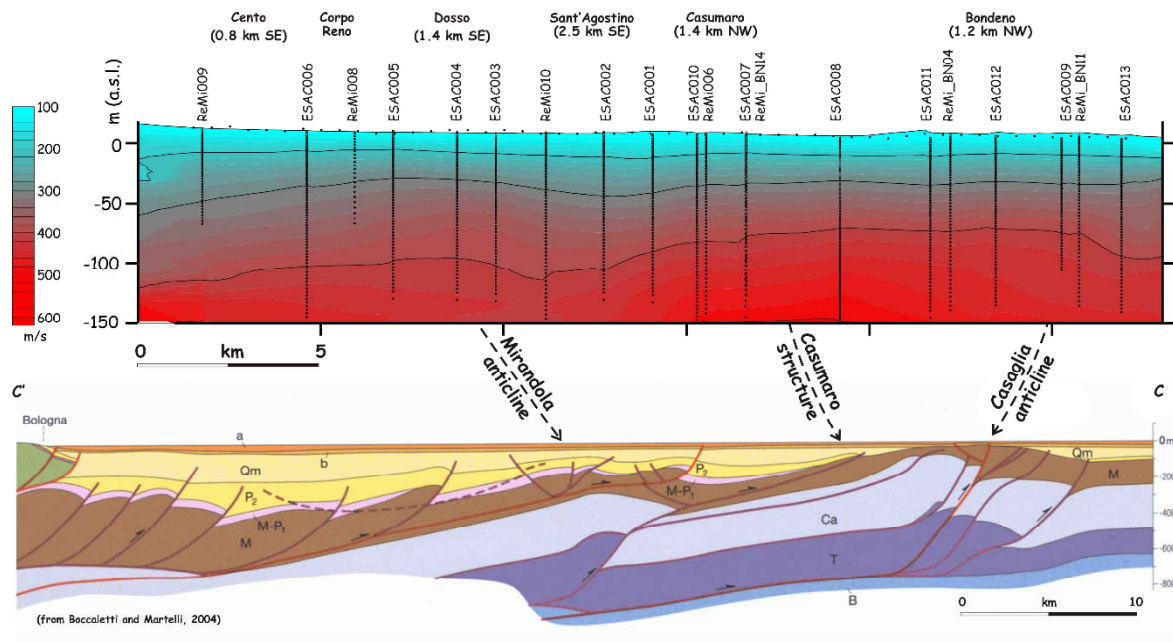


Figura 5 - Profilo superiore: distribuzione nei primi ca. 150 m delle velocità delle onde di taglio ottenuta per interpolazione di numerose indagini ESAC e Re.Mi. Le variazioni laterali sono state correlate con strutture tettoniche profonde (profilo inferiore) suggerendo una loro continua crescita e la possibile attività sismogenica recente.

Anche se non è da escludere completamente un contributo legato a fenomeni di compattazione differenziale, le diverse caratteristiche meccaniche osservate all'interno della successione sedimentaria recente sono probabilmente da attribuire alla coeva attività di crescita delle strutture anticlinali in corrispondenza delle quali gli spessori sono ridotti. In Figura 5 è evidente la correlazione fra i diversi gradienti di velocità ed i principali lineamenti tettonici presenti nel sottosuolo dell'area indagata.

Uno degli effetti cosismici che spesso si verificano in conseguenza della riattivazione di faglie cieche relativamente superficiali, come nel caso della pianura padana, è la formazione di un sollevamento di forma ellissoidale e con estensione areale proporzionale alle dimensioni della struttura sismogenica profonda. Anche in concomitanza dei terremoti del 20 e 29 maggio si sono verificati tali fenomeni in corrispondenza delle due aree epicentrali (Bignami *et al.*, 2013). La Figura 6 mostra i sollevamenti registrati a seguito degli eventi sismici del maggio 2012 grazie ad una tecnica satellitare di interferometria differenziale (DInSAR).

Come conseguenza della geometria e della cinematica di queste sorgenti sismogeniche, il volume di roccia al di sopra della rottura è interessato da un tipico processo di piegamento

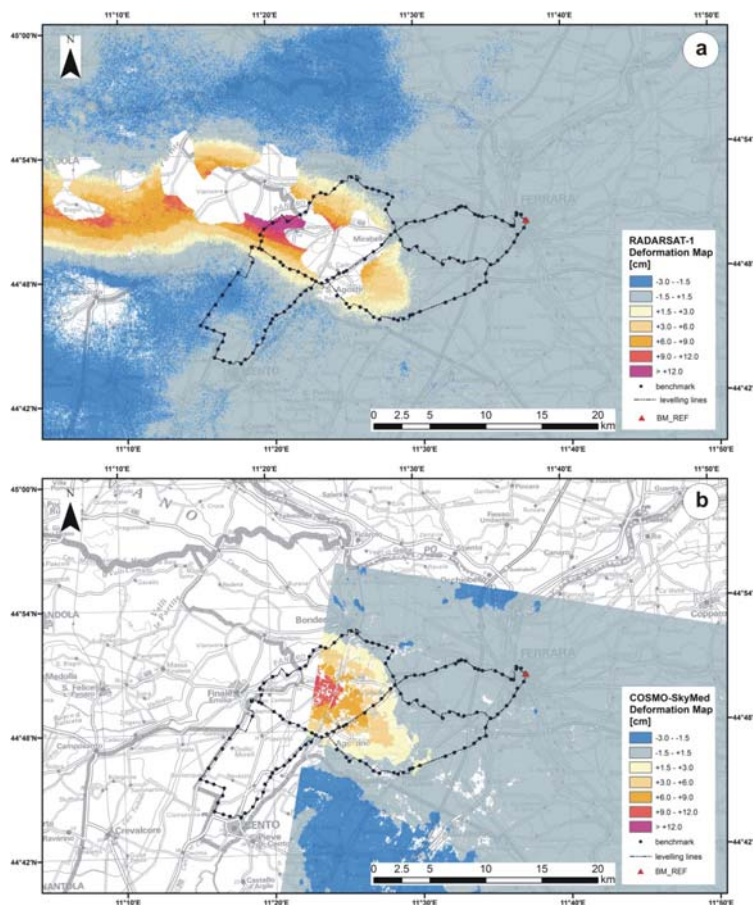


Figura 6 - Immagini di interferometria differenziale (DInSAR) effettuata sui dati dei satelliti RADARSAT-1 (a) e COSMO-SkyMed-1 (b). In (a) le immagini utilizzate sono del 12 maggio e del 5 giugno 2012 e documentano la deformazione superficiale indotta da entrambe le scosse principali. In (b) le immagini sono del 19 e 23 maggio ed hanno registrato soltanto il sollevamento del 20 maggio (Caputo *et al.*, 2014).

per propagazione di faglia (*fault-propagation folding*) che provoca il sollevamento della cresta in prossimità dell'area epicentrale e, quindi, la deformazione della superficie topografica (Okada, 1985).

Nonostante l'elevato tasso di sedimentazione che caratterizza la Pianura Padana, il ripetersi nel tempo di simili 'terremoti morfogenici areali' (Caputo, 2005), ha causato effetti cumulativi sulla stratigrafia e sulla morfologia dell'area dando luogo a successioni sedimentarie 'condensate' come descritto precedentemente (Figure 3, 4 e 5) e temporaneamente a gradienti topografici che, anche se estremamente blandi, hanno influito sulla idrografia dell'area.

In queste condizioni, infatti, i sistemi fluviali sono particolarmente sensibili alle deformazioni verticali generate dall'attività di queste strutture tettoniche. Nelle zone in sollevamento tendono a manifestarsi fenomeni erosivi e di divergenza fluviale, mentre in quelle subsidenti prevalgono la sedimentazione e l'attrazione del sistema di drenaggio (Burrato *et al.*, 2003). Quanto affermato finora, appare chiaro osservando la Figura 7 che mostra l'evoluzione dei fiumi Secchia, Panaro e Reno, che sono i corsi d'acqua più importanti che attraversano l'area colpita dalla sequenza sismica del maggio 2012, a partire dal VIII secolo a.C. fino all'attuale.

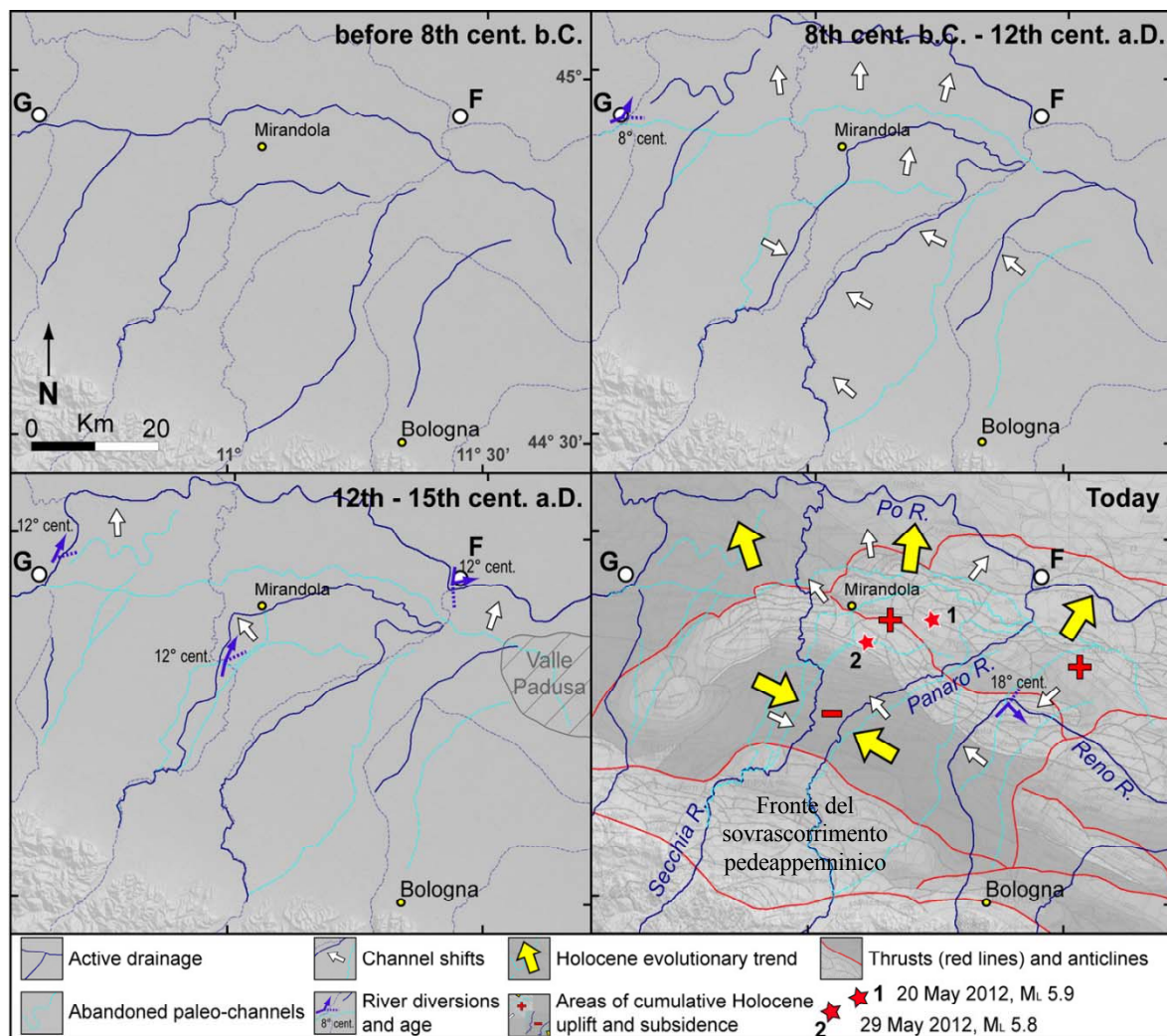


Figura 7 – Evoluzione del sistema di drenaggio nel settore centrale della Pianura Padana meridionale, a nord di Bologna (Castaldini *et al.*, 1979; MURST, 1997a; Burrato *et al.*, 2013). Il sistema di drenaggio attuale (linee tratteggiate in azzurro) è riportato sullo sfondo di tutte le carte. La mappa sullo sfondo dell'ultima carta è tratta da Bigi *et al.* (1992). Età delle diversioni fluviali da MURST (1997a)



L'andamento di questi fiumi permette di evidenziare la presenza di una zona di attrazione confinata tra il fronte del sovrascorrimento pedeappenninico e le Pieghe ferraresi, mentre la zona di avulsione si localizza proprio in corrispondenza delle anticlinali sepolte (Burrato *et al.*, 2013) ben visibili nelle Figure 3, 4 e 5.

I fiumi Secchia e Panaro sono affluenti del Po, mentre originariamente il Reno fluiva in un canale del Po praticamente abbandonato durante il XII secolo in conseguenza di una rotta catastrofica nei pressi di Ficarolo (punto F) che ne ha causato la migrazione del corso principale verso nord (Bondesan, 2001). A seguito di questo evento, il fiume Reno ha iniziato a scaricare il suo carico sedimentario in un'area paludosa, chiamata Valle Padusa, richiedendo continui interventi di bonifica. e successivamente direttamente in mare grazie ad importanti interventi di bonifica.

Anche i fiumi Secchia e Panaro, nel corso del tempo sono stati deviati a causa degli stessi meccanismi profondi convergendo in una zona depocentrale a sud di Mirandola e divergendo a valle di questa città non appena attraversato il sistema delle Pieghe Ferraresi (Burrato *et al.*, 2013).





2. Neotettonica e sismicità

La sismicità di un territorio è strettamente connessa al contesto geodinamico e tettonico, quindi alla presenza di strutture geologicamente attive. Alla base di ogni stima della pericolosità sismica vi è l'indispensabile conoscenza della storia sismica e della geologia strutturale locale, fattori strettamente connessi tra loro.

Per realizzare l'inquadramento sismotettonico di questo studio sono stati utilizzati database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca. In particolare, per l'analisi della sismicità storica e strumentale dell'area in oggetto di indagine sono stati utilizzati:

1) il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.1.1 (INGV – DISS Working Group, 2010; <http://diss.rm.ingv.it/diss>) che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni in cui si localizzano faglie (composite) in grado di generare terremoti di magnitudo ≥ 5 ;

2) la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale;

3) il DBMI11 – Database Macrosismico Italiano (Locati *et al.*, 2011; <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>), che riporta le osservazioni, in termini di intensità, relative a 1681 terremoti a partire dall'anno 1000 e fino al 2006.



2.1. Sorgenti Sismogeniche

Secondo il *Database of Individual Seismogenic Sources* (INGV - DISS Working Group, 2010; Basili *et al.*, 2008), il Comune di Sant'Agostino è interessato da due strutture sismogeniche composite orientate approssimativamente ESE-WNW (Figura 8). All'estremità nord del territorio comunale si trova la sorgente composta Poggio Rusco-Migliarino (ITCS050) che delimita il settore esterno dell'Arco Ferrarese. A tale struttura è correlata la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090) a cui è assegnata una magnitudo massima pari a 5.5. L'esistenza della sorgente di Ferrara è basata sull'evidenza di attività tettonica recente dell'Arco Ferrarese e su dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012). Questa sorgente è infatti associata con il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570 ed è stata localizzata considerando la deviazione dell'alveo del fiume Po, in zona Stellata, come probabile conseguenza della deformazione cosismica indotta dall'attività tettonica di tale struttura sepolta.

La porzione centro-meridionale del territorio comunale, invece, si trova sulla proiezione superficiale della sorgente composta di Novi-Poggio Renatico (ITCS051) a cui è associata la

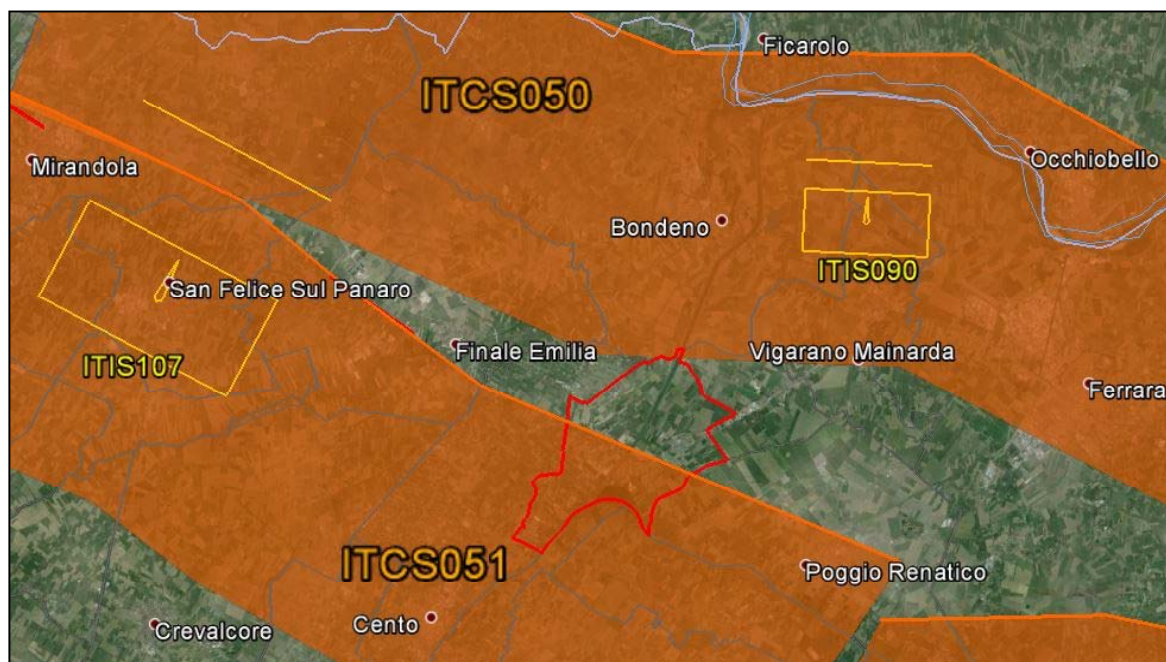


Figura 8 - Sorgenti sismogeniche composite (poligoni arancioni) e individuali (rettangoli gialli) presenti nel DISS 3.1.1 (DISS Working Group, 2012) nell'intorno del Comune di Sant'Agostino.

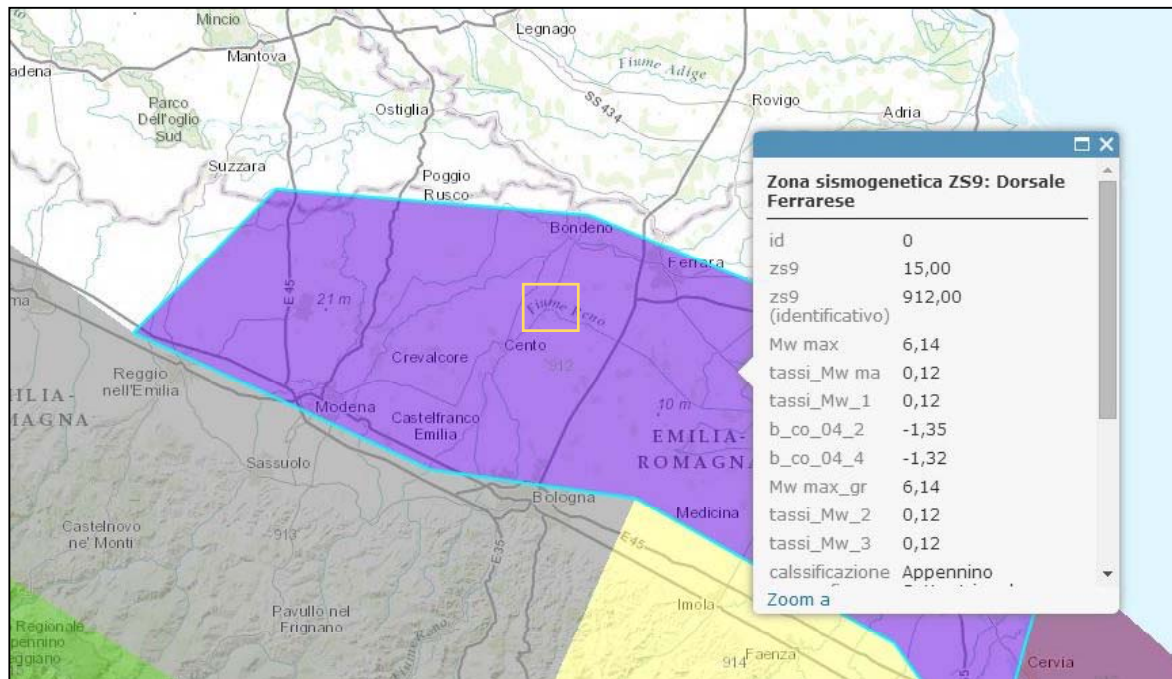


Figura 9 - Ubicazione del territorio comunale di Sant'Agostino rispetto alla Zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) caratterizzata da una magnitudo massima pari a 5.9. L'esistenza di quest'ultima sorgente individuale, coincidente con il sovrascorrimento responsabile della strutturazione dell'anticlinale di Mirandola, è stata ipotizzata a partire dall'osservazione della presenza di anomalie nel reticolo idrografico sviluppatasi in corrispondenza dell'attraversamento dell'anticlinale sepolta, come descritto nel Capitolo 1.

Secondo la Zonazione Sismogenetica del Territorio Italiano (ZS9) (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il Comune di Sant'Agostino ricade nella "Zona 912" per la quale è stato stimato un valore di M_{wmax} pari a 6.14 (Figura 9). Come vedremo successivamente, tale valore è stato preso in considerazione per la valutazione del potenziale di liquefazione (ved. paragrafo 7.3).



2.2. Storia sismica di Sant'Agostino

Al momento della redazione del presente studio, nel Database Macrosismico Italiano – DBMI11 (Locati *et al.*, 2011) sono riportati soltanto sei record relativi agli effetti di eventi sismici storici per la località di Sant'Agostino (Tabella 1). Per ciascun terremoto sono riportati il valore di intensità avvertito a Sant'Agostino (I_{MCS}) in occasione di un determinato terremoto, l'epicentro macrosismico (A_x), il numero di località nelle quali è stato avvertito l'evento (N_p), l'intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo (M_w) stimata mediante relazioni empiriche.

I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2.

Le storie sismiche di centri abitati vicini a Sant'Agostino, come ad esempio Cento e Ferrara, hanno un numero molto maggiore di *record* relativi al risentimento in occasione di terremoti storici. La mancanza di testimonianze scritte per l'abitato di Sant'Agostino non significa però che il territorio comunale non abbia subito gli effetti di diversi altri terremoti nel passato.

Pertanto, al fine di ricostruire e 'completare' la storia sismica di Sant'Agostino sono stati presi in considerazione tutti i terremoti riportati nel DBMI11 (Locati *et al.*, 2011) a partire

I_{MCS}	data	A_x	N_p	I_0	M_w
4	1951/05/15 22:54	Lodigiano	154	6-7	5.39 ±0.14
4	1963/04/05 13:49	Finale Emilia	6	4-5	4.09 ±0.34
3	1963/08/09 06:05	Faentino	16		4.99 ±0.18
5	1971/07/15 01:33	Parmense	229	8	5.64 ±0.09
5	1983/11/09 16:29	Parmense	850	6-7	5.06 ±0.09
4	1989/09/13 21:54	Pasubio	779	6-7	4.88 ±0.09

Tabella 1 - Record delle intensità osservate a Sant'Agostino, tratte dal DBMI11 (Locati *et al.*, 2011). Nella prima colonna è indicata l'intensità MCS registrata a Sant'Agostino. A_x : nome dell'evento; N_p : numero di osservazioni relative all'evento; I_0 : intensità massima epicentrale; M_w : magnitudo momento ricavata mediante relazioni empiriche.



Grado	Scossa	Descrizione degli effetti
I	impercettibile	Avvertita solo dagli strumenti sismici.
II	molto leggera	Avvertita solo da qualche persona in opportune condizioni.
III	leggera	Avvertita da poche persone. Oscillano oggetti appesi con vibrazioni simili a quelle del passaggio di un'automobile.
IV	moderata	Avvertita da molte persone, tremito di infissi e cristalli, leggere oscillazioni di oggetti appesi.
V	piuttosto forte	Avvertita anche da persone addormentate, caduta di oggetti.
VI	forte	Qualche leggera lesione negli edifici e finestre in frantumi.
VII	molto forte	Caduta di fumaiole, lesioni negli edifici.
VIII	rovinosa	Rovina parziale di qualche edificio; qualche vittima isolata.
IX	distruttiva	Rovina totale di alcuni edifici e gravi lesioni in molti altri; vittime umane sparse ma non numerose.
X	completamente distruttiva	Rovina di molti edifici, molte vittime umane; crepacci nel suolo.
XI	catastrofica	Distruzione di agglomerati urbani; moltissime vittime; crepacci e frane nel suolo; maremoto.
XII	apocalittica	Distruzione di ogni manufatto; pochi superstiti; sconvolgimento del suolo; maremoto distruttivo; fuoriuscita di lava dal terreno.

Tabella 2 - Scala delle intensità macrosismiche Mercalli-Cancani-Sieberg.

dall'anno 1000 e fino al 2006 con distanza epicentrale inferiore ai 200 km. Sono state poi applicate due relazioni empiriche che permettono di stimare l'intensità al sito.

La prima relazione utilizzata è quella proposta da Blake (1941) e permette di calcolare in maniera deterministica l'intensità mediante la seguente equazione

$$I_0 - I = s \cdot \log\left(\sqrt{1 + (D/h^2)}\right) \quad [1]$$

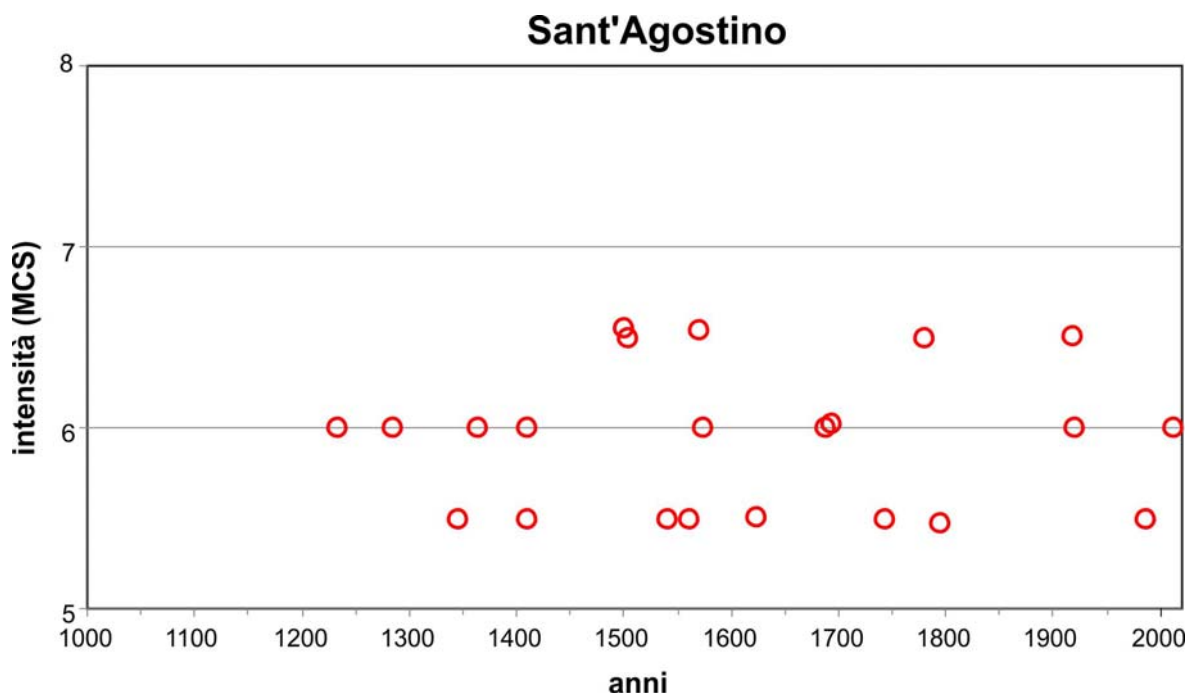


Figura 10 - Valori di intensità macrosismica (MCS) stimati per il territorio di Sant'Agostino dall'anno 1000 al 2006 prendendo in considerazione eventi sismici in un raggio di 200 km e calcolando il valore di intensità mediante la relazione empirica di Blake (1941) riportata in equazione [1]. Il terremoto del 2012 è stato aggiunto come riferimento.

dove I_0 è l'intensità epicentrale, I l'intensità al sito, s il coefficiente di attenuazione, D ed h rispettivamente la distanza epicentrale e la profondità ipocentrale, espresse in chilometri.

Il grafico in Figura 10 mostra chiaramente come in occasione di circa 15 eventi sismici gli effetti sul territorio comunale di Sant'Agostino sarebbero stati pari e addirittura superiori al VI grado della Scala MCS, che generalmente corrisponde alla soglia di danneggiamento del patrimonio edilizio. La frequenza media, dal primo forte terremoto registrato ad oggi, è di un evento potenzialmente dannoso ogni circa 60 anni.

La seconda relazione, sviluppata da Pasolini *et al.* (2008), stima l'intensità al sito in maniera probabilistica esprimendo la probabilità di superamento di una determinata intensità al sito sulla base delle seguenti equazioni:

$$I = I_E - (0.0086 \pm 0.0005) \cdot (D - h) - (1.037 \pm 0.27) \cdot [\ln(D) - \ln(h)] \quad [2]$$

$$I_E = -(0.893 \pm 0.254) + (1.118 \pm 0.033) \cdot I_0 \quad [3]$$

$$D = \sqrt{R^2 + h^2} \quad [4]$$

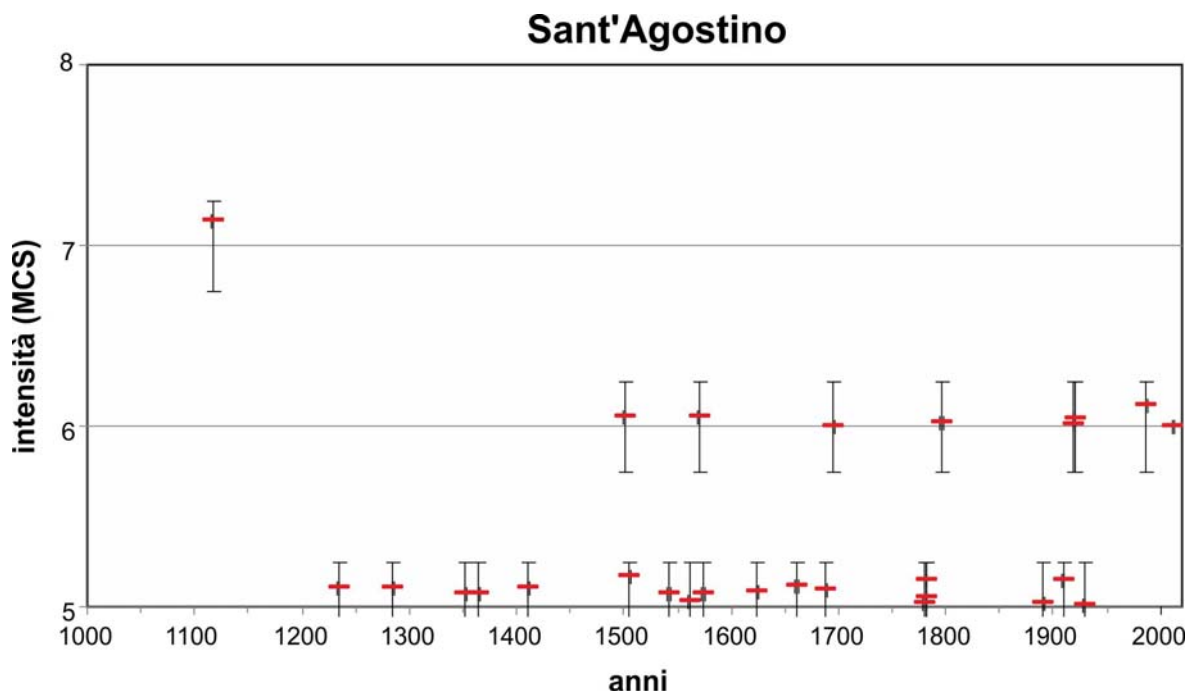


Figura 11 - Valori di intensità macrosismica (MCS) stimati per il territorio di Sant'Agostino dall'anno 1000 al 2006 prendendo in considerazione eventi sismici in un raggio di 200 km e calcolando il valore di intensità mediante la relazione empirica di Pasolini *et al.* (2008) riportata in equazione [2]. Il terremoto del 2012 è stato aggiunto come riferimento.

dove I_E rappresenta l'intensità media attesa all'epicentro, I_0 l'intensità epicentrale, I l'intensità al sito, R la distanza epicentrale, h la profondità ipocentrale assunta pari a 3.91 ± 0.27 , e D la distanza focale. Gli ultimi tre parametri sono tutti espressi in chilometri.

Il grafico di Figura 11 riporta le intensità stimate a Sant'Agostino con probabilità di superamento almeno pari o superiori al 50% calcolato sulla base delle relazioni proposte da Pasolini *et al.* (2008). Anche in questo caso è evidente come effetti del VI grado della Scala MCS siano da considerarsi tutt'altro che rari e con una frequenza media di un tale evento ogni circa 100 anni.



2.3. Paleoliquefazioni

A seguito della scossa principale del 20 maggio 2012, si sono manifestati diffusi effetti cosismici secondari, che verranno dettagliatamente descritti nel paragrafo successivo. Al fine di investigare e documentare l'occorrenza di paleo liquefazioni dovute a terremoti storici, poche settimane dopo l'evento è stata realizzato una trincea paleosismologica con il supporto della Amministrazione del Comune di Sant'Agostino.

Lo scavo, localizzato sul paleo argine destro del fiume Reno a nord del cimitero di Sant'Agostino ($44^{\circ}47'56''$ N, $11^{\circ}24'05''$ E) aveva una lunghezza di oltre 55 m, una larghezza da 5 a 8 m ed una profondità media di 5 m approfondita localmente ad oltre 7 m (Figura 12). Lo scavo a tale profondità è stato reso possibile grazie all'intervento volontaristico della Ditta Grillanda di Ro che ha effettuato un carotaggio all'interno della trincea installando una pompa per il drenaggio temporaneo della falda acquifera.

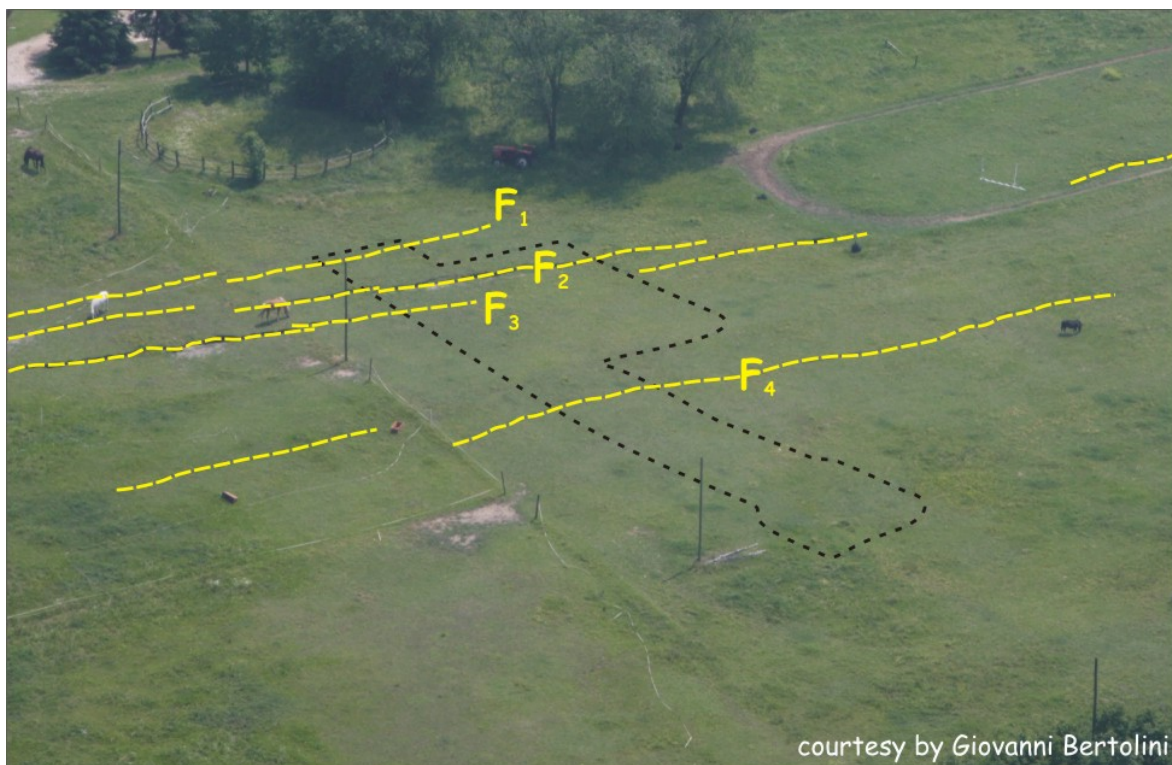


Figura 12 - Vista aerea del sito dove è stata scavata la trincea paleosismologica nell'estate 2012 per studiare gli effetti della liquefazione. Lo studio ha permesso di documentare l'occorrenza di simili fenomeni probabilmente da imputare al terremoto di Ferrara del 1570 (Caputo *et al.*, 2012b]. Si ringrazia il dott. Giovanni Bertolini della Regione Emilia-Romagna per la fotografia.

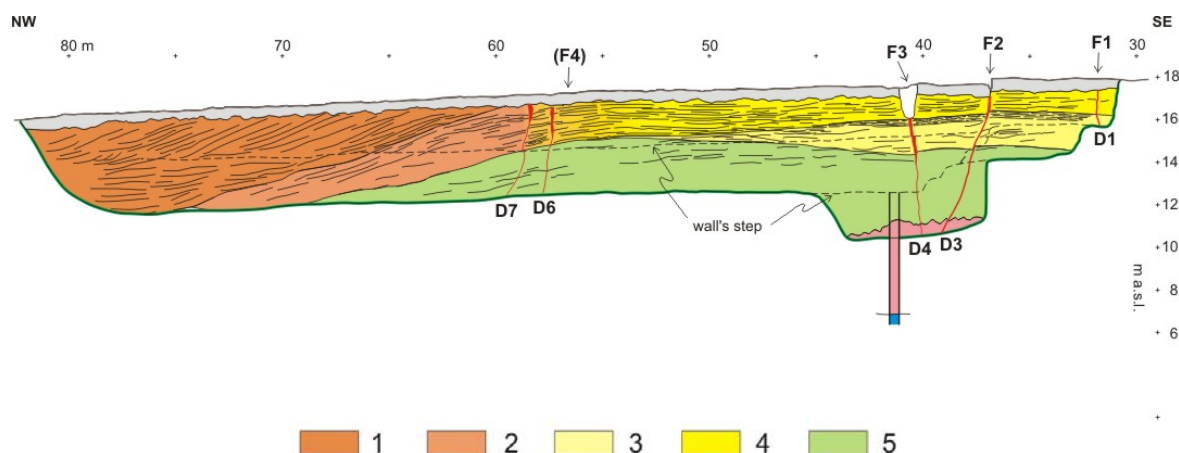


Figura 13 - Log stratigrafico e strutturale della trincea paleosismologica (parete sudorientale) effettuata attraverso l'argine destro abbandonato del Fiume Reno a sud di San Carlo. 1) sabbie medie di riempimento di canale fluviale e barra laterale; 2) sabbie fini di barra laterale, interessate da diffusi fenomeni di deformazione gravitativa e cosismica; 3) sabbie e subordinati limi di argine naturale, coevi all'unità (2) e alla parte più antica dell'unità (1); 4) sabbie fini e limi di argine naturale, provenienti da un alveo precedente del Reno; 5) limi e limi argillosi, con subordinate sabbie, di argine distale, con evidenze di pedogenesi ed attività antropica. D#: principali dicchi con riempimenti di sabbie iniettate. F#: fratture superficiali cosismiche La fascia superiore grigia indica la porzione perturbata dall'aratura meccanica e da altre pratiche agricole. (modificata da Caputo *et al.*, 2012b).

La superficie topografica in corrispondenza della trincea era stata interessata durante l'evento sismico da numerose fratture, parallele alla direzione di allungamento della cresta del paleo argine, ma da nessuna eruzione di sabbia. Questa caratteristica si è rilevata fondamentale proprio per lo studio di paleo eventi di liquefazione.

Lo scavo ha consentito di osservare direttamente e per una superficie particolarmente estesa, le geometrie deposizionali, le strutture sedimentarie ed i caratteri granulometrici delle diverse unità (Figura 13). E' stato così possibile esaminare le relazioni stratigrafiche fra i diversi corpi deposizionali mettendo in evidenza diverse fasi di aggradazione e progradazione laterale (Caputo *et al.*, 2012a). L'importanza dei risultati di questo scavo per le conoscenze del sottosuolo dell'area di indagine è notevole considerando che le informazioni litostratigrafiche fino ad allora disponibili erano limitate alle carote ottenute mediante sondaggi, a scavi pellicolari o indirettamente mediante prove penetrometriche.

Nella sezione stratigrafica ottenuta dall'analisi dettagliata delle pareti della trincea, sono state riconosciute le seguenti unità sedimentarie: sedimenti distali di argine, sabbie e limi prossimali di argine e sabbie di riempimento di canale fluviale (Figura 13).

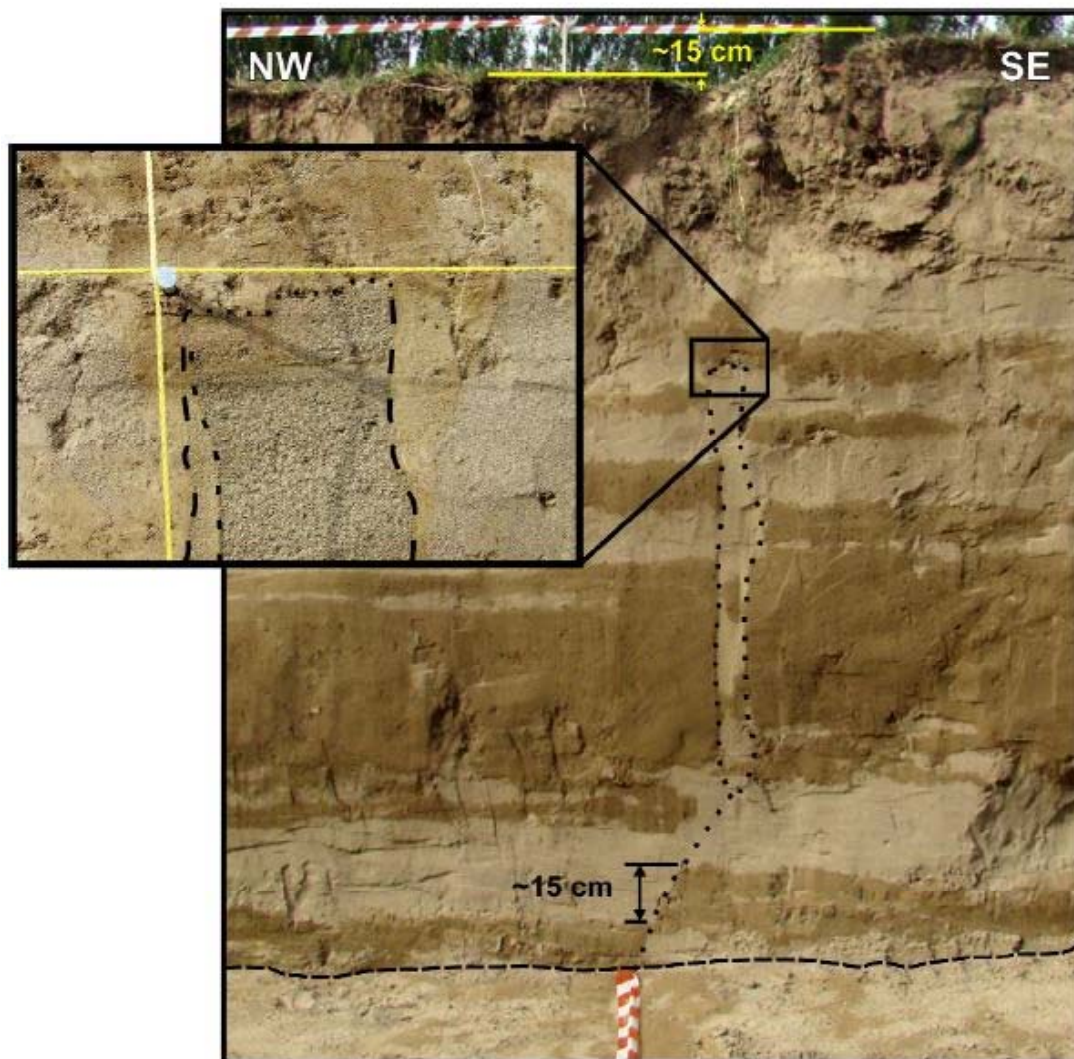


Figura 14 - Esempio di dicco suturato da sedimenti recenti. Alla base è visibile un rigetto verticale di circa 15 cm anch'esso legato ad un evento sismico e conseguente liquefazione avvenuto nel passato (da Caputo *et al.*, 2012].

Inoltre, osservando le pareti della trincea è stato possibile notare come i depositi prossimali di argine siano attraversati da numerosi dicchi sabbiosi, di spessore variabile tra 10 e 12 cm, alcuni dei quali in connessione diretta con la superficie tramite il sistema di fratture. La mancata espulsione di queste sabbie conferma che il materiale è stato iniettato nei dicchi durante un evento di liquefazione delle sabbie ma precedente al maggio 2012. Quanto ipotizzato è supportato da un'ulteriore osservazione che riguarda la sutura di alcuni dicchi sabbiosi da parte di sedimenti più recenti associati a tracimazione fluviale (Figura 14).

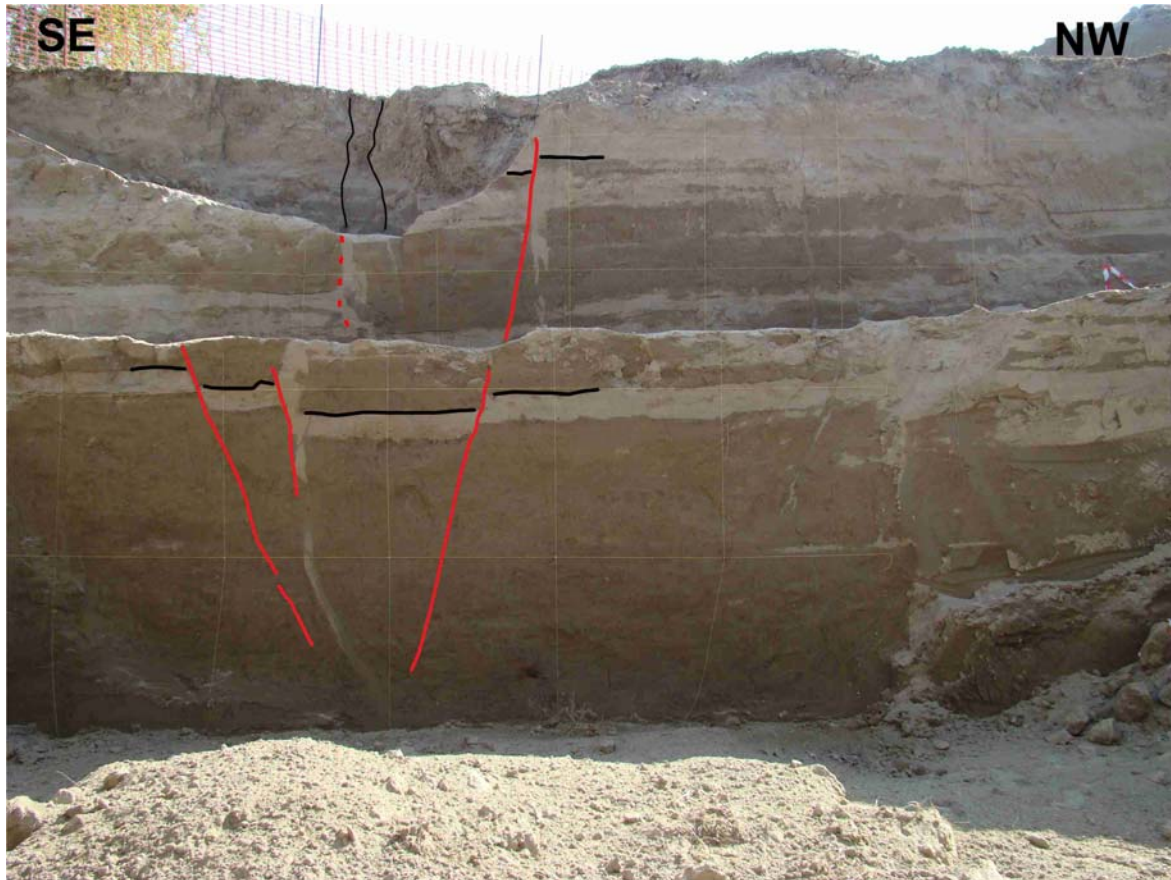


Figura 15 - Settore meridionale della parete SO della trincea paleosismologica. Le linee nere evidenziano i dicchi sabbiosi associati ad eventi di risalita di sabbie liquefatte, mentre le linee arancio delimitano i principali orizzonti sabbiosi. In rosso un sistema di fratture antitetiche, che formano un graben estensionale.

Osservando le relazioni geometriche tridimensionali fra le fratture sono state riconosciute strutture antitetiche che formano piccoli graben estensionali (Figura 15), responsabili di fenomeni di espansione laterale gravitativa (Papathanassiou *et al.*, 2012), evidenti in corrispondenza di alcuni dicchi associati a rigetti verticali anche superiori a 15 cm.

Sono state inoltre osservate le cosiddette strutture deformative 'da carico' (*load structures*; Figura 16), individuate laddove l'interfaccia tra il sedimento sabbioso grossolano e quello siltoso-argilloso sovrastante è irregolare: la loro origine non può essere sedimentaria bensì è dovuta allo scuotimento sismico che ha favorito il mescolamento dei due materiali.

Infine, fra i depositi di riempimento di canale e quelli di argine prossimale si osservano nicchie di distacco metriche, legate a fenomeni di franamento verso il canale probabilmente indotti da un sisma, suturate in seguito da nuovi sedimenti.



Figura 16 - Esempio di 'strutture da carico' (*load structures*), all'interno dei depositi di riempimento di canale, che documentano probabili fenomeni di liquefazione coevi con la sedimentazione e quindi precedenti al terremoto del 2012 (da Caputo *et al.*, 2012a).

Sulla base di tutte queste evidenze, si ritiene che quanto osservato sia il risultato di un meccanismo di espansione gravitativa laterale, indotto dallo scollamento parziale e temporaneo su un livello di sabbie liquefatte, tra l'altro orizzonte sorgente dei materiali iniettati nei dicchi. I risultati di una serie di indagini geotecniche, realizzate in prossimità dello scavo, hanno consentito di individuare questo orizzonte, di spessore variabile tra 1.5 e 4 m, ad una profondità di 7-8 m dalla superficie.

Questo studio ha chiaramente dimostrato l'esistenza di paleo liquefazioni antecedenti il terremoto del 20 maggio 2012 che, grazie all'analisi delle fonti storiografiche (Guidoboni, 1994; Guidoboni *et al.*, 2007) sono state attribuite alla scossa principale della sequenza sismica che ha seriamente danneggiato la città di Ferrara, nel novembre 1570.

3. La sequenza sismica del maggio 2012

Tra maggio e giugno 2012, un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della Pianura Padana emiliana, provocando 27 vittime, migliaia di feriti e di senzatetto, seri danni ai centri storici ed alle zone industriali, per un danno economico stimato di circa 2 miliardi di euro.

La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali. La prima, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro, si è verificata il 20 maggio alle 02:03 UTC di M_L pari a 5.9 ($44^{\circ}51'50''$ N, $11^{\circ}14'31''$ E, $h = 6.3$ km; stella rossa in Figura 17), mentre il secondo si è verificato il 29 maggio alle 07:00 UTC di M_L pari a 5.8 ($44^{\circ}50'00''$ N, $11^{\circ}03'37''$ E, $h = 13.5$ km; stella arancio in Figura 17), 15 km a sud-ovest della prima scossa (Massa *et al.*, 2012).

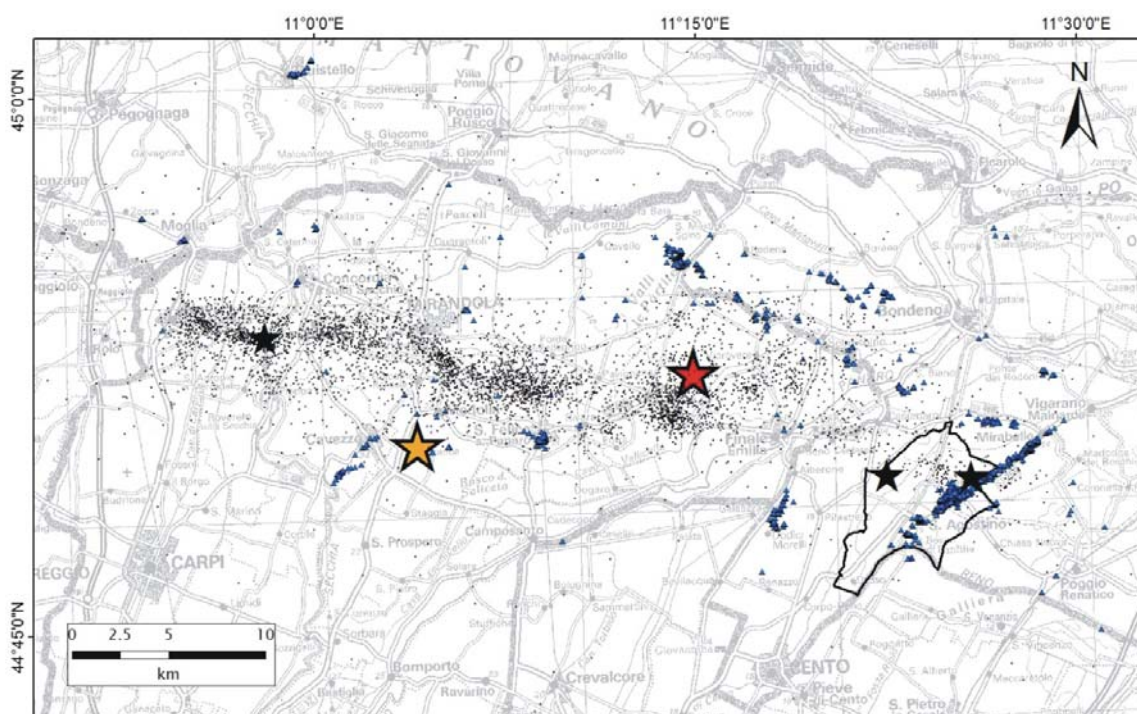


Figura 17 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rossa e arancio si riferiscono rispettivamente alle scosse principali del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* maggiori ($M_w \geq 5.0$), mentre i puntini neri gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I triangoli azzurri evidenziano le liquefazioni osservate (Caputo e Papathanassiou, 2012; Emergeo Working Group, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012]. I limiti del territorio comunale di Sant'Agostino sono indicati.



Gli *aftershocks* hanno interessato un'area estesa oltre 50 km in direzione E-W, con cinque repliche di $M_w \geq 5.0$ (stelle nere in Figura 17) ed oltre 3700 scosse di $M_w \geq 1.5$ (puntini neri in Figura 17).

La sequenza sismica del maggio 2012 ha interessato una porzione del fronte esterno del prisma di accrezione dell'Appennino settentrionale, le cosiddette Pieghe Ferraresi, che come già detto sono formate da una serie di pieghe e sovrascorrimenti N e NE vergenti che coinvolgono sia la copertura sedimentaria che la sequenza carbonatica Mesozoica.

I meccanismi focali degli eventi principali suggeriscono una cinematica, e quindi un movimento delle faglie sepolte, di tipo compressivo lungo piani orientati essenzialmente E-W ed immergenti verso S (Pondrelli *et al.*, 2012; Scognamiglio *et al.*, 2012), in accordo con quanto emerso da studi del campo di velocità derivato da misure GPS (Devoti *et al.*, 2011) e dagli indicatori del campo di stress agente su questa area (Montone *et al.*, 2012).

3.1. Effetti superficiali secondari

A seguito della scossa del 20 maggio si sono manifestati importanti fenomeni di liquefazione delle sabbie che hanno causato gravi danni agli edifici, alle strutture industriali prefabbricate, ai sottoservizi ed alle strade, specialmente presso l'abitato di San Carlo. Gli effetti co-sismici secondari più evidenti sono rappresentati da eruzioni di sabbia puntuali ed allineate, rotture superficiali, dislocazioni laterali e cedimenti differenziali (Caputo e Papathanassiou, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; GdL Liquefazione RER, 2012; Emergeo Working Group, 2013).

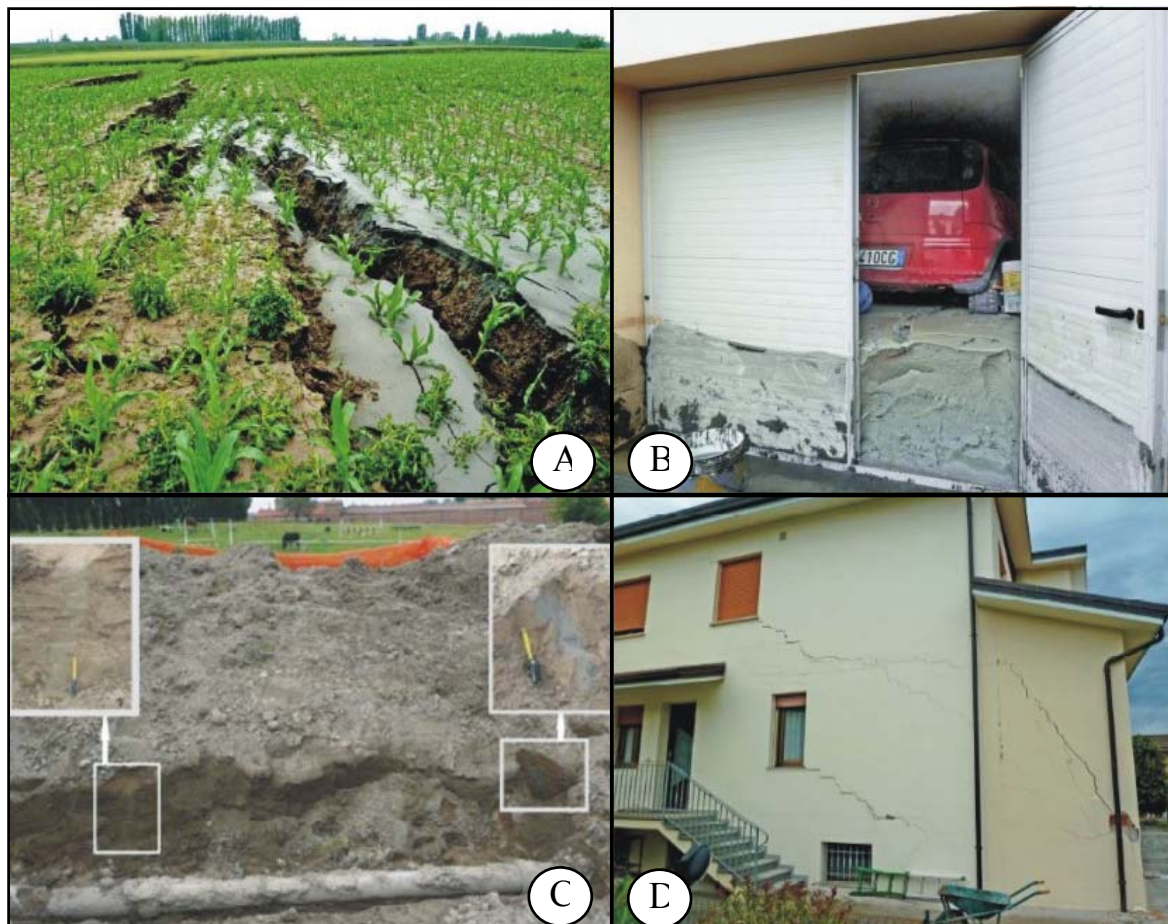


Figura 18 - Esempi di fenomeni superficiali dovuti alla liquefazione indotta dal terremoto del 20 maggio. a) fratture con movimenti gravitativi ed eiezione di sabbia; b) eruzione di sabbia da un pavimento all'interno di un garage costruito in corrispondenza di un vecchio pozzo per acqua; c) rotture di tubazioni; d) cedimenti differenziali di fonadamenta e conseguente danneggiamento di edificio.



Lo spessore delle sabbie estruse in superficie variava da circa 40 cm nei campi, ad oltre 1 m in alcuni garages e appartamenti di San Carlo (Figura 18) (Emergeo Working Group, 2013). Un caso particolarmente interessante riguarda un pozzo nelle vicinanze del centro di San Carlo, nel quale il materiale liquefatto è risalito per oltre due metri al di sopra del piano campagna ed è stato espulso in superficie con una forza tale da danneggiarlo. Papathanassiou *et al.* (2012) hanno stimato che la pressione del fluido in risalita poteva essere probabilmente maggiore di un bar (0.1 MPa).

La lunghezza delle fratture superficiali indotte dalla liquefazione variava da pochi centimetri a più di 10 m, ed in alcuni casi fino ad oltre 50 m; la larghezza invece da pochi centimetri fino a circa 30-40 cm (Lai *et al.*, 2012; Papathanassiou *et al.*, 2012; Emergeo Working Group, 2013).

La maggior parte delle effusioni di sabbia si è verificata attraverso fratture e spaccature nei campi e nella pavimentazione stradale, mentre il numero di vulcani di sabbia è stato significativamente minore (Papathanassiou *et al.*, 2012). Riguardo questi ultimi, il diametro massimo osservato era di circa 10 m, ma quando coalescenti si potevano estendere per oltre 50 m.

In alcuni scavi artificiali realizzati per riparare i danni ai sottoservizi, sono state osservate fratture e dicchi riempiti di materiale sabbioso che non hanno raggiunto la superficie. Ciò a riprova che la liquefazione può provocare danni anche quando non si manifesta direttamente in superficie.

L'enorme quantità di materiale estruso a San Carlo ha anche prodotto in superficie cedimenti localizzati e differenziali, dovuti allo svuotamento parziale ed alla compattazione dei livelli liquefatti (Emergeo Working Group, 2013).



3.2. Effetti di amplificazione locale

Un altro importante effetto secondario è legato ai fenomeni di amplificazione del moto del suolo. Secondo la mappa di pericolosità sismica di riferimento (<http://esse1-gis.mi.ingv.it>; INGV, 2004), nelle aree epicentrali l'accelerazione massima attesa, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni su suolo rigido e pianeggiante (categoria di sottosuolo A, NTC 2008) è compresa tra 0.125-0.175 g.

Nell'ambito degli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" (D.A.L. n. 112/2007) e in coerenza con la L.R. n. 20/2000 "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio", è stato previsto l'utilizzo di abachi diversi a seconda della stratigrafia, della profondità del substrato roccioso (maggiore o minore di 100 ± 20 m) e del valore della velocità delle onde di taglio nei primi 30 m dal piano campagna (v_{s30}).

Disponendo di queste informazioni è quindi possibile desumere i valori del fattore di amplificazione in termini di *accelerazione di picco* (FA_{PGA}) ed in termini di *Intensità di Housner* per intervalli di periodo compresi tra 0.1 e 0.5 s ($FA_{0.1-0.5_s}$) e tra 0.5 e 1 s ($FA_{0.5-1_s}$). Tali intervalli corrispondono ai periodi di vibrazione delle maggior parte delle tipologie edilizie più comuni nel territorio regionale.

Una serie di analisi di risposta sismica locale effettuate da Facciorusso *et al.* (2012) e Laurenzano *et al.* (2013), confrontando dati reali con dati attesi, hanno fornito valori del fattore di amplificazione in generale accordo con quelli degli abachi regionali (Allegato A2, DAL 112/2007). In realtà, in occasione degli eventi del maggio 2012 sono stati localmente registrati anche valori di accelerazione orizzontali superiori a 0.3 g, di gran lunga maggiori rispetto a quelli attesi. La Regione Emilia-Romagna si è quindi impegnata per verificare e rivalutare i fattori di amplificazione da attribuire in contesti geologici come quelli dell'area epicentrale ed in particolare nei 17 comuni dell'Ordinanza 70/2012.

A tal fine, sono state confrontate una serie di indagini geofisiche con alcuni profili stratigrafici del sottosuolo padano. Ciò ha permesso di evidenziare un contrasto di impedenza, e quindi di una variazione delle proprietà geofisiche del sottosuolo, ben riconoscibile in buona parte dell'area epicentrale a profondità comprese tra circa 70 e 150 m. Tale variazione



litologico-geofisica è stata associata all'interfaccia tra il tetto del Sintema Emiliano-Romagnolo (AES, 400-450 ka; RER & ENI-AGIP, 1998) e la base del subsistema AES6 (230-250 ka; RER & ENI-AGIP, 1998; ved. Figura 4). Anche se la velocità delle onde di taglio nell'unità inferiore non raggiunge mai gli 800 m/s, necessari per poter definire quest'ultimo il 'substrato geofisico' come previsto dalla normativa, ai fini della microzonazione sismica dei 17 Comuni ed in particolare per definire il fattore di amplificazione, è stata presa in considerazione la profondità del tetto di AES indicandolo convenzionalmente come 'pseudo-substrato'.

Pertanto, sulla base delle isobate del suddetto limite stratigrafico, il Servizio Geologico regionale ha tentativamente distinto le aree dove il tetto dello pseudo-substrato si trova a profondità maggiori di 120 m (100 + 20 m per includere l'incertezza) da quelle dove il substrato è a profondità minori. Tali aree sono state indicate come A1 e A2, rispettivamente. Utilizzando quindi gli abachi regionali, i fattori di amplificazione per le due aree sono i seguenti:

$$\text{aree A1: } FA_{PGA} = 1.5; \quad FA_{0.1-0.5s} = 1.8; \quad FA_{0.5-1s} = 2.5 \quad [5]$$

$$\text{aree A2: } FA_{PGA} = 1.7; \quad FA_{0.1-0.5s} = 1.9; \quad FA_{0.5-1s} = 2.6 \quad [6]$$

Per quanto riguarda il Comune di Sant'Agostino, la maggior parte del territorio comunale rientra nell'area A1 ed è quindi caratterizzata da un fattore d'amplificazione $FA_{PGA} = 1.5$. Soltanto un ristretto settore sudoccidentale del Comune rientra nell'area A2 ed è perciò caratterizzato da un fattore di amplificazione leggermente più elevato ($FA_{PGA} = 1.7$). Tale variazione laterale è dovuta alla presenza nel sottosuolo della terminazione periclinale dell'anticlinale sepolta di Mirandola (ITIS107; Figura 8) la cui cresta è orientata circa ESE-WNW. Come è stato descritto nel capitolo 2, simili piegamenti nel sottosuolo sono dovuti a ripetute riattivazioni di una faglia cieca la cui attività tardo-quadernaria è chiaramente documentata dall'evidente deformazione dei depositi appartenenti all'unità stratigrafica AES6 (230-250 ka; Figura 4).

La campitura delle due aree A1 ed A2 è rappresentata in modo semplificato in Figura 19 e riportata nella Tavola 4 (Allegato D) "Carta dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione" e similmente nella Tavola 5 (Allegato D) "Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica".

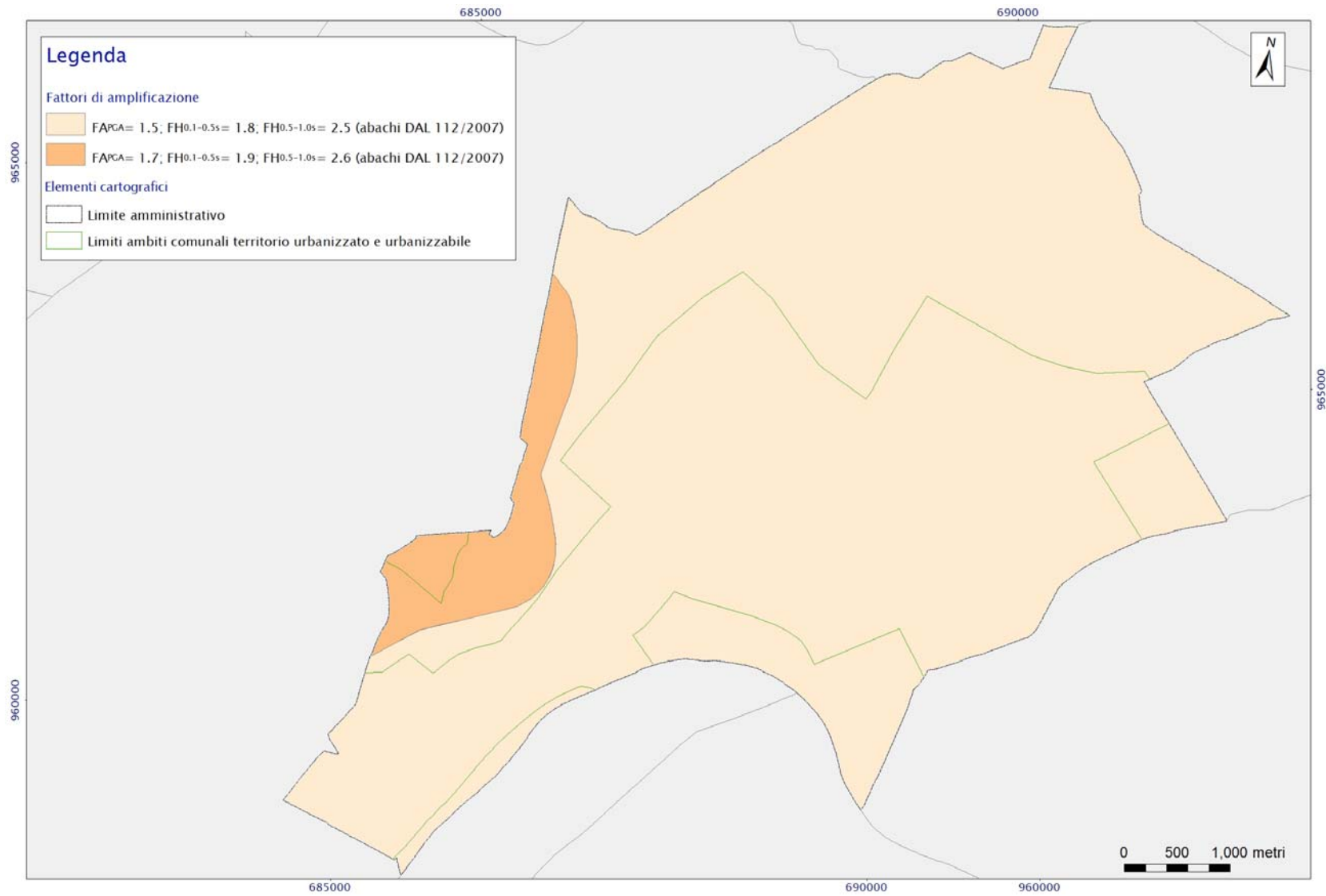


Figura 19 - Carta dei fattori di amplificazione per il territorio del Comune di Sant'Agostino. Riproduzione semplificata e a scala ridotta della Tavola 4 (Allegato D) "Carta dei Fattori di Amplificazione e del rischio di liquefazione"





Parte seconda

-

Indagini





4. Indagini geotecniche

In questo capitolo sono descritte le diverse tipologie di indagini geognostiche effettuate sul territorio di Sant'Agostino che sono state prese in considerazione per le finalità del presente lavoro di microzonazione sismica. Si tratta in particolare di diversi tipi di penetrometrie statiche e di sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo.

Generalmente le indagini più recenti raggiungono una profondità di 20-30 m, mentre le prove più datate e soprattutto i pozzi per acqua hanno spesso profondità di indagine inferiori ai 10-15 m. Inoltre, la qualità dell'informazione geologica e geotecnica ed il suo grado di attendibilità sono ovviamente legati al tipo di prova ma anche all'epoca in cui essa è stata effettuata.

Per quanto riguarda le penetrometrie, le principali informazioni ed i grafici relativi all'andamento dei parametri misurati in funzione della profondità sono riportati nell'Allegato A ("Schede tecniche indagini penetrometriche") per tutte le prove di questo tipo incluse nella banca dati utilizzata per il presente lavoro.



4.1. Penetrometrie statiche

Esistono diversi tipi di prove penetrometriche statiche CPT (*Cone Penetration Test*) che consistono nell'infiggere verticalmente nel terreno una punta conica di dimensioni standard misurando separatamente, ma con relativa continuità, lo sforzo necessario per la penetrazione della punta (resistenza alla punta, q_c) e l'adesione terreno-acciaio (attrito laterale, f_s) di un manicotto posto sopra la punta.

Le CPT classiche sono caratterizzate da una registrazione dei valori di resistenza in superficie mediante punta 'meccanica'. Nel caso in cui la punta sia strumentata con sensori elettrici ed i segnali vengano trasmessi in superficie via cavo si parla di punta 'elettrica' e la prova viene indicata come CPTE.

La misura di q_c ed f_s viene effettuata ogni 20 cm di avanzamento della punta nel caso delle prove CPT, mentre per le CPTE ogni 5 cm. In entrambi i casi, il rapporto di prova è costituito da due grafici che mostrano l'andamento della q_c e della f_s con la profondità, come negli esempi rappresentati in Figure 20 e 21.

Se la punta elettrica è munita di un settore poroso e relativo sensore di rilevamento della pressione di fluido, è possibile misurare anche la pressione dell'acqua del terreno ($u_2 = u_0 + \Delta u$), dove u_0 è la pressione idrostatica mentre Δu è quella generata dallo sforzo per la penetrazione nel terreno. Questo tipo di punta viene definita 'piezocono' e la sigla della prova è CPTu (*Cone Penetration Test with Pore Pressure measurement*). In questo caso, la misura di q_c , f_s e u_2 viene effettuata ogni 2 cm di avanzamento della punta (Cestari, 2009). In Figura 22 è rappresentato un esempio di rapporto di prova CPTu.

Vi è inoltre la possibilità di dotare la punta elettrica con dei ricevitori, come geofoni o accelerometri che viene così definita 'piezocono sismico' e la relativa sigla è SCPTu. Questo tipo di indagini offrono anche informazioni 'geofisiche' e per tale motivo saranno descritte più dettagliatamente nel capitolo successivo.



**PROVA PENETROMETRICA STATICA
DIAGRAMMA DI RESISTENZA**

CPT 20

3.010496-003

- committente:	Amm.ne Comunale di S. Agostino (Ferrara)	- data prova :	04/04/2001
- lavoro:	P.R.G. - Variante Generale 2001	- quota inizio :	Piano Campagna
- località:	Dosso - Area 7	- prof. falda :	0.90 m da quota inizio
- resp. cantiere:		- scala vert.:	1 : 100
- assist. cantiere:		- data emiss.:	20/02/2013

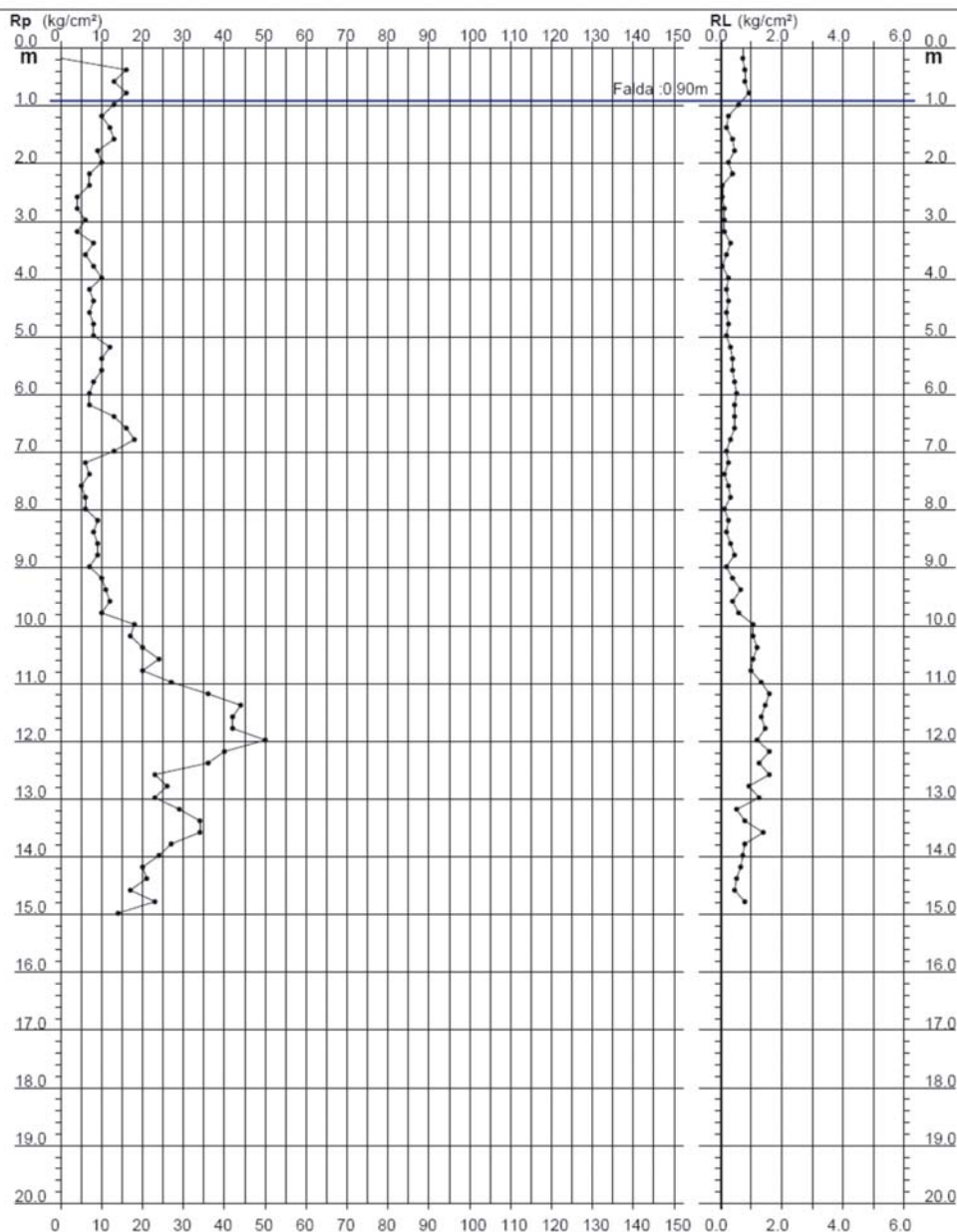


Figura 20 - Esempio di rapporto di prova ottenuto da una penetrometria statica di tipo meccanico (CPT). La curva di sinistra rappresenta l'andamento della resistenza alla punta, q_c , mentre quella di destra il corrispondente valore dell'attrito laterale, f_s , entrambi in funzione della profondità. La linea blu, indica il livello della falda freatica durante la perforazione.

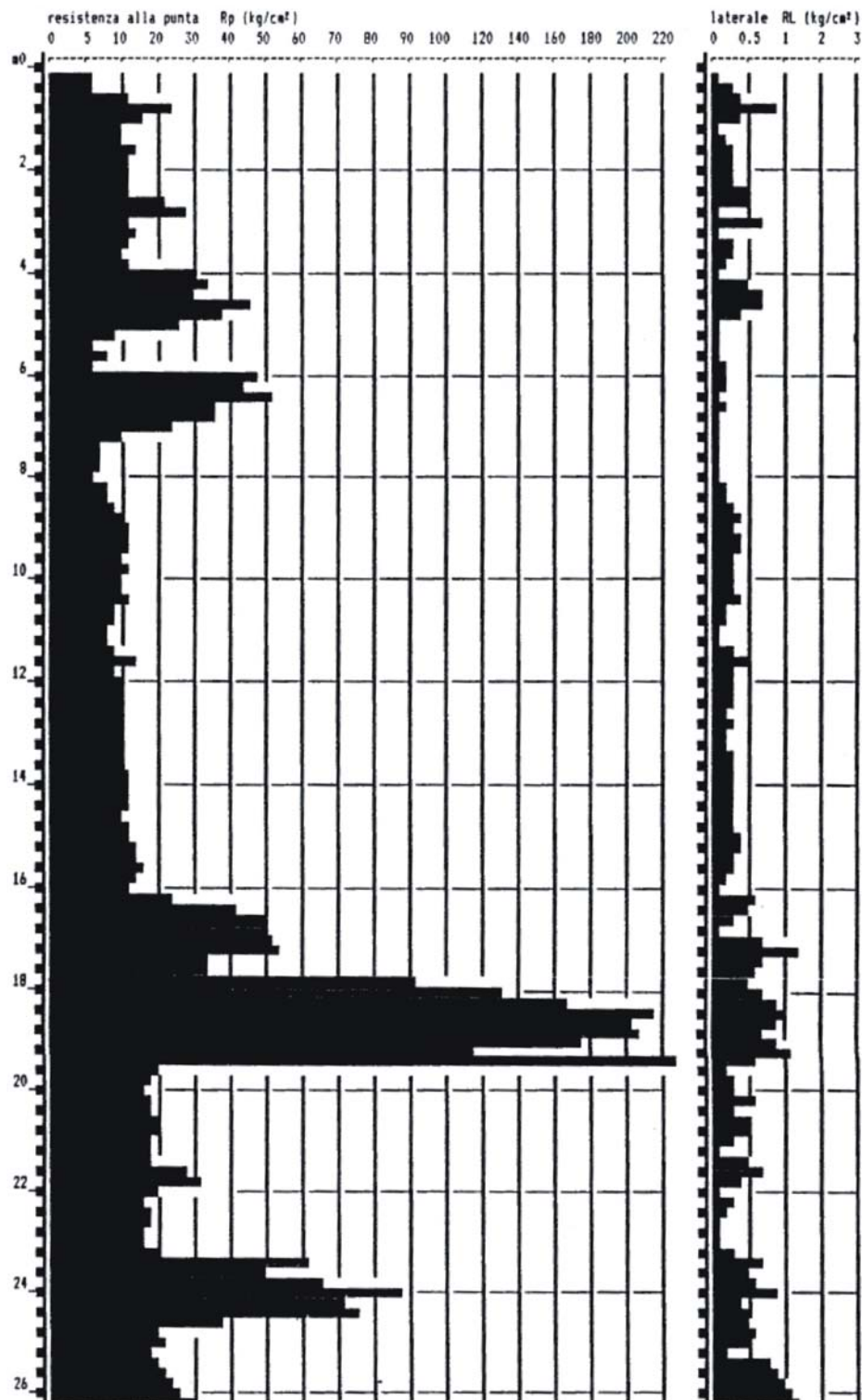


Figura 21 - Esempio di rapporto di prova ottenuto da una penetrometria statica di tipo elettrico (CPT). L'istogramma di sinistra rappresenta l'andamento della resistenza alla punta, q_c , mentre quello di destra il corrispondente valore dell'attrito laterale, f_s , entrambi in funzione della profondità.

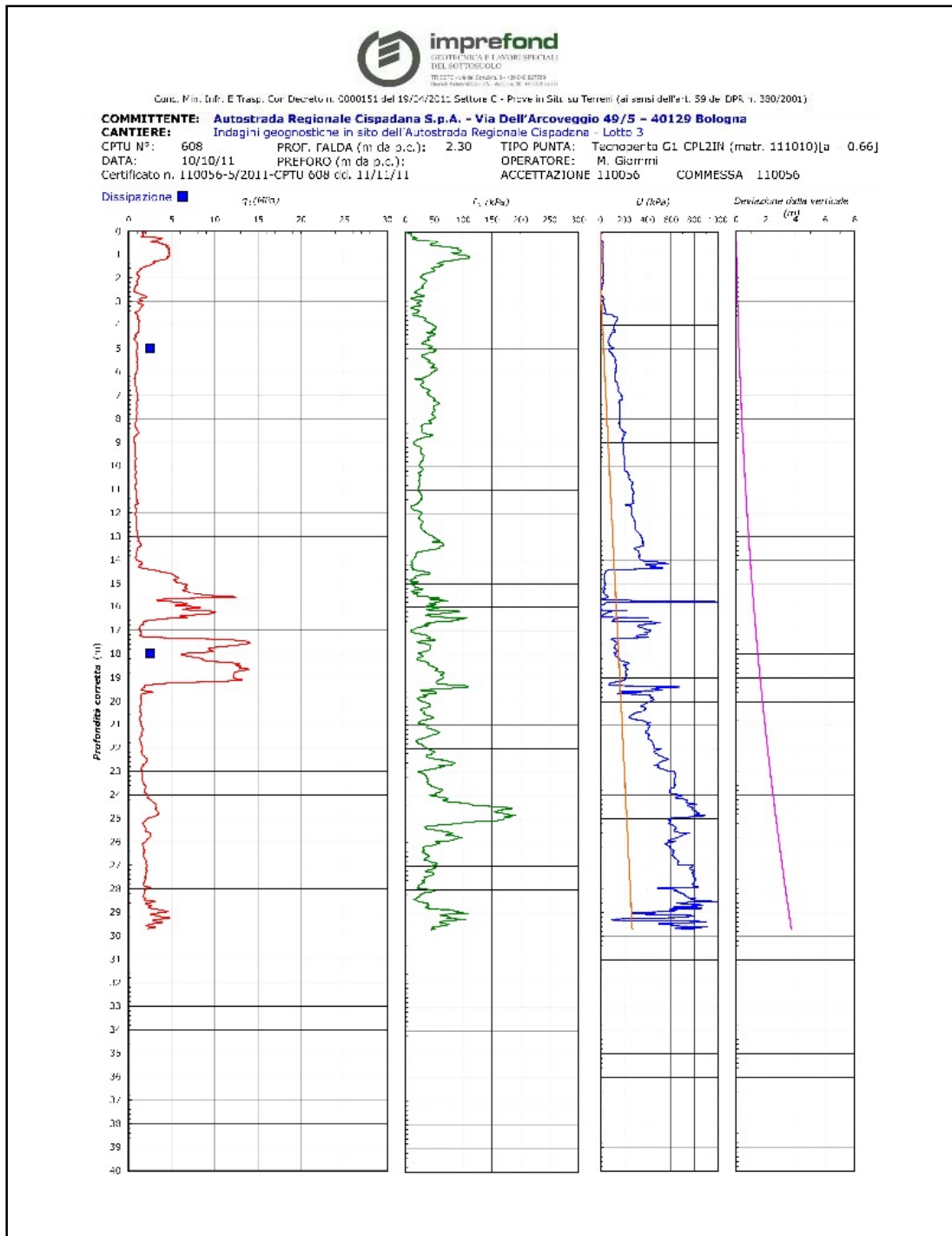


Figura 22 - Esempio di rapporto di prova ottenuto da una penetrometria statica di tipo elettrico (CPTU). I grafici, da sinistra verso destra, rappresentano 1) l'andamento della resistenza alla punta, q_c , 2) il corrispondente valore dell'attrito laterale, f_s , 3) la pressione interstiziale (curva blu) e la pressione idrostatica (curva gialla), 4) la deviazione dalla verticale delle aste durante la penetrazione. Tutte le curve sono espresse in funzione della profondità.



4.2. Sondaggi

Il termine sondaggio indica una perforazione effettuata nel terreno mediante idonea attrezzatura. I sondaggi possono essere di due tipi: a carotaggio continuo ed a distruzione di nucleo. La perforazione a carotaggio continuo consente di prelevare carote per tutta la profondità di indagine permettendo di osservare direttamente le litologie attraversate e di caratterizzare il profilo stratigrafico del sottosuolo, nonché prelevare campioni per le indagini di laboratorio. Le carote, opportunamente suddivise in aste di un metro, sono generalmente conservate in casse apposite e ciò permette di effettuare eventuali ulteriori studi (Figura 23).

Se l'obiettivo è invece quello di raggiungere una determinata profondità, ad esempio per l'installazione di uno strumento di misura o per il prelievo di un campione, sono comunemente utilizzate attrezzature che disgregano il terreno con velocità di avanzamento della punta molto maggiori e, quindi, con costi di perforazione molto minori rispetto al carotaggio continuo. In questo caso si parla di sondaggio a distruzione di nucleo (Lancellotta, 2012). Durante le operazioni di sondaggio, il fluido di perforazione porta in superficie, come materiale in sospensione, numerosi frammenti dei livelli sedimentari o rocciosi attraversati, i cosiddetti *cuttings*. Da questi frammenti è possibile distinguere le principali variazioni litologiche e, anche se in modo approssimato, ricostruire una colonna stratigrafica semplificata del sottosuolo.

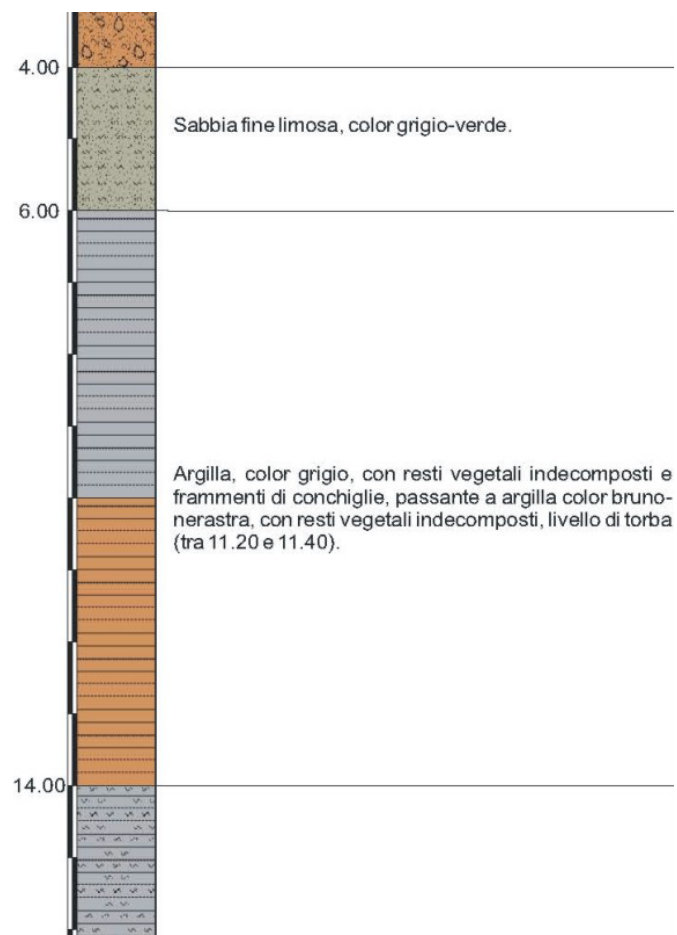


Figura 23 - Esempio di carota ottenuta mediante sondaggio grazie al quale è possibile ottenere informazioni dirette del sottosuolo e ricostruire così una stratigrafia ben vincolata. Ciò permette anche di meglio tarare i risultati di penetrometrie ed altre indagini indirette effettuate nei dintorni.





5. Indagini geofisiche

Lo scopo principale di questo tipo di indagini è quello di caratterizzare il sottosuolo dal punto di vista geofisico ed in particolare di definire la velocità media di propagazione delle onde di taglio nel sottosuolo così definita

$$v_{sN} = N / \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i} \quad [5]$$

dove h_i è lo spessore dello strato i -esimo, v_i la velocità di propagazione delle onde di taglio nello strato i -esimo ed N la profondità di indagine. Tra tutte le onde sismiche quelle di taglio sono le principali responsabili dei danneggiamenti strutturali agli edifici.

In particolare, le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008), e successive modifiche ed integrazioni, fanno riferimento alla cosiddetta v_{s30} che rappresenta la velocità delle onde sismiche di taglio nei primi 30 m. Tale parametro permette di discriminare la categoria di sottosuolo per la definizione dell'azione sismica ai fini delle analisi di risposta sismica locale.

Nell'ambito del presente lavoro, sono stati calcolati i valori di v_{s30} con diverse tecniche di indagine, come descritto di seguito, grazie alla disponibilità di indagini geofisiche preesistenti e di nuova realizzazione, effettuate nel territorio del Comune di Sant'Agostino. Tutti tali valori sono riportati nella Tavola 6 (Allegato D) "Carta della velocità delle onde di taglio", rappresentata anche ad una scala ridotta in Figura 24.

Oltre allo specifico parametro v_{s30} , altre tipologie di indagini geofisiche (es. HVSR ed ESAC) sono utilizzate per ricavare informazioni geologiche relativamente più profonde come, ad esempio, la profondità del substrato roccioso.



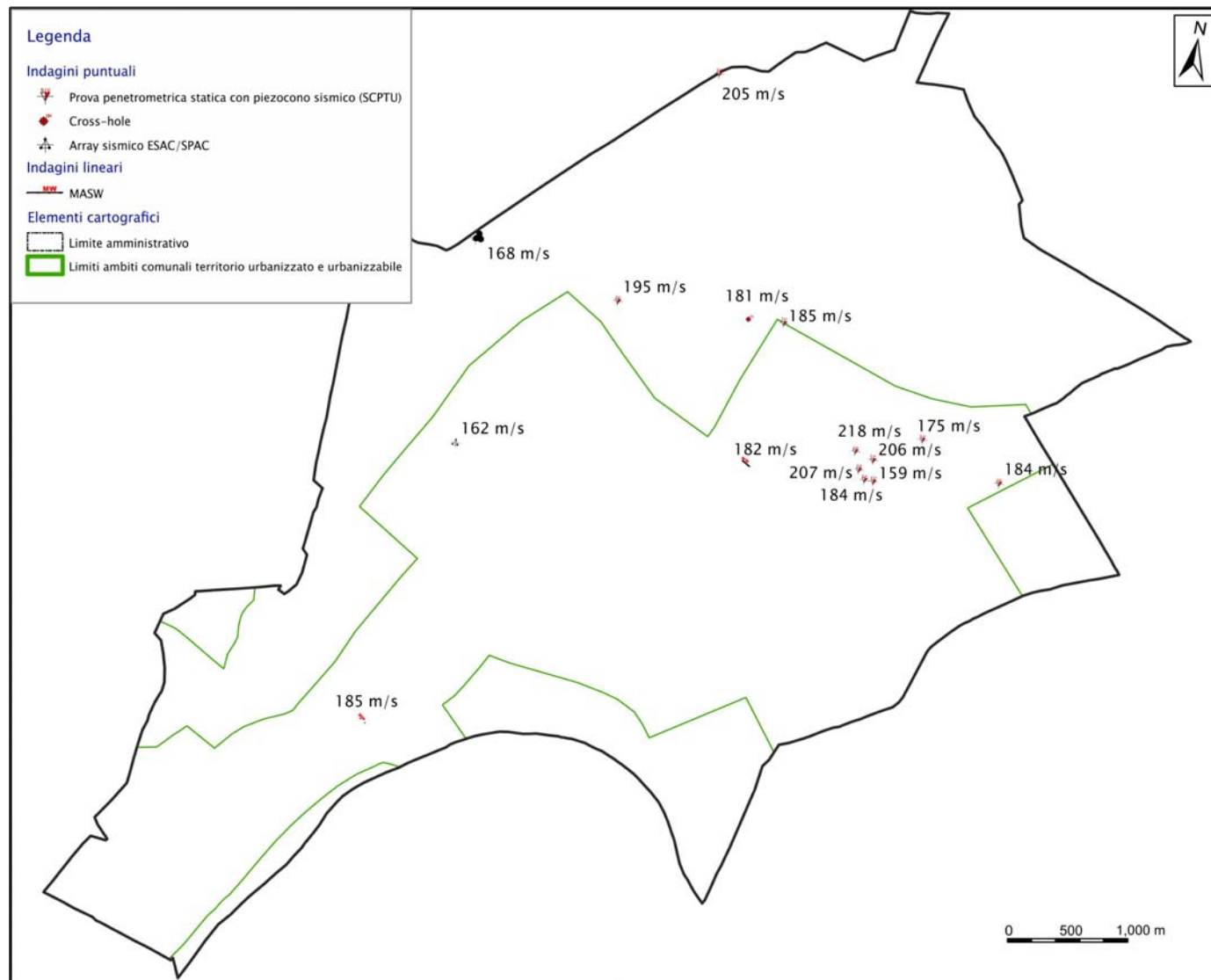


Figura 24 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 6 (Allegato D) "Carta della velocità delle onde di taglio".





5.1. Penetrometrie statiche SCPTu

Come anticipato nel paragrafo 4.1, sopra la punta elettrica di un penetrometro possono essere inseriti dei ricevitori, come geofoni o accelerometri. Con un'opportuna strumentazione e generando in superficie una sorgente di onde sismiche può essere misurato il tempo di arrivo delle onde dirette al ricevitore in profondità, analogamente a quanto avviene con il metodo geofisico chiamato *downhole*. Ripetendo l'operazione in modo sistematico a diverse profondità è quindi possibile ricostruire il profilo di velocità delle onde sismiche ed in particolare delle onde di taglio (v_s) lungo la verticale della prova. Il rapporto di prova è generalmente prodotto sia in formato grafico che tabellare (Figura 25).

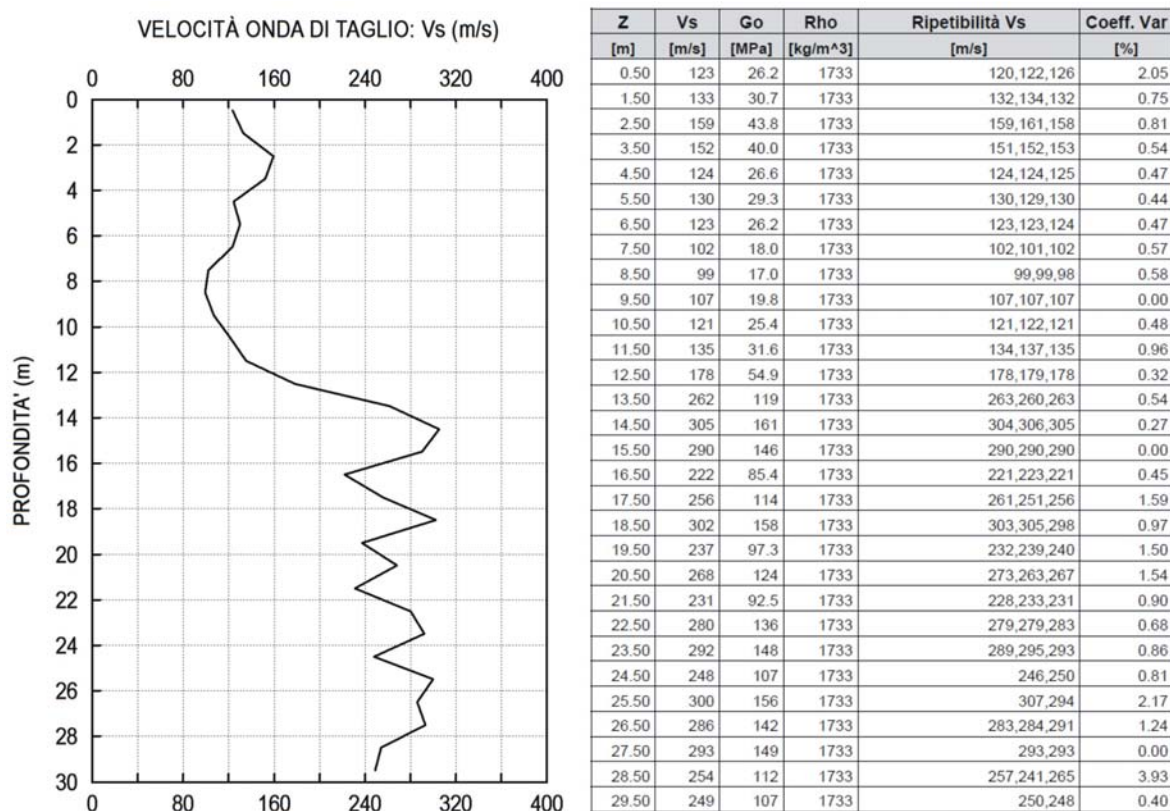


Figura 25 - Esempio di rapporto di prova SCPTu, in forma grafica (sinistra) e tabellare (destra), relativo alla misura della velocità delle onde di taglio (v_s).

5.2. Indagini MASW

Il metodo *Multichannel Analysis of Surface Waves* (MASW) è una tecnica di indagine geofisica non invasiva che consente di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio (v_s), basandosi sulla registrazione delle onde superficiali, tramite opportuni sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del terreno. Si tratta di uno dei diversi metodi utilizzati per il calcolo del parametro v_{s30} .

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh (onde di superficie che generano oscillazioni ellittico-retrograde nel mezzo che attraversano), che in un mezzo stratificato presentano il fenomeno della dispersione. Questo fenomeno rappresenta una deformazione del treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità (v) con la frequenza (f). In un mezzo stratificato le diverse lunghezze d'onda λ (o frequenze) del segnale sismico si propagano ad una velocità diversa in funzione delle caratteristiche del mezzo. Le componenti a frequenza minore (λ maggiore) penetrano più in profondità e sono quindi influenzate dagli strati più profondi rispetto a quelle a frequenza maggiore (λ minore)

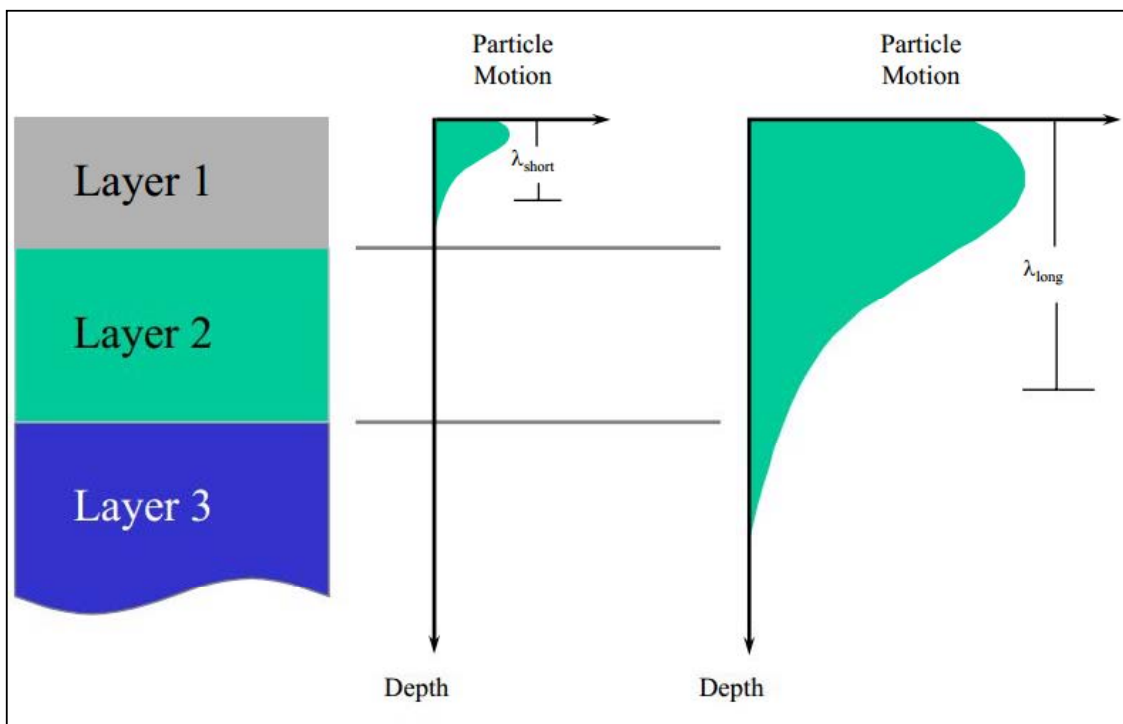


Figura 26 - Rappresentazione grafica del fenomeno della dispersione delle onde Rayleigh.



che risentono delle proprietà fisiche dei livelli superficiali (Figura 26).

Attraverso l'analisi di questo tipo di onde è possibile ricavare indirettamente la velocità delle onde di taglio (v_s), secondo l'equazione:

$$v_R = \left(\frac{0.862 + 1.14 \cdot \nu}{1 + \nu} \right) \cdot v_s \quad [6]$$

dove ν è il rapporto di Poisson, v_R la velocità delle onde Rayleigh e v_s la velocità delle onde di taglio.

Il metodo di indagine MASW si distingue in attivo e passivo (Zywicki, 1999). Nel metodo attivo, in un punto noto della superficie di campagna vengono generate delle onde superficiali che sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Per il metodo passivo, invece, lo stendimento può essere sia lineare sia circolare e ciò che viene registrato è il cosiddetto rumore sismico ambientale (*noise*) causato sia da fenomeni naturali sia da attività antropiche. Per *noise* si intende l'insieme di oscillazioni di piccola ampiezza (10^{-4} - 10^{-2} mm) della superficie terrestre, con un contenuto in frequenza estremamente variabile (0.01-200 Hz). Le caratteristiche del rumore sismico ambientale sono principalmente condizionate da due fattori: i) il tipo di sorgente, sia essa naturale (come ad esempio le maree) o antropica (come ad esempio il traffico veicolare), e ii) le proprietà meccaniche dei terreni attraversati dai raggi sismici (ICMS, 2008).

La prima fase dell'analisi consiste nella conversione dei dati acquisiti dal dominio del tempo a quello delle frequenze (trasformata f-K) per la costruzione degli spettri di potenza (Figura 27) nel dominio frequenza – velocità di fase (f-v). Ciò è necessario per la discriminazione modale delle onde di Rayleigh (R). Dall'analisi della distribuzione dell'energia presente in tali spettri si esegue il cosiddetto *picking* della curva di dispersione sperimentale (Figura 27) del modo fondamentale delle onde R. Successivamente, una procedura di modellazione numerica (*trial and error*) consente di determinare un modello di sottosuolo monodimensionale in termini di v_s e di spessore (Figura 27). A tale modello corrisponde infatti una curva di dispersione teorica da confrontare con la curva di dispersione sperimentale ottenuta precedentemente (operazione di *fitting*). La buona sovrapposizione fra queste due curve è indice di compatibilità del modello di sottosuolo con le misure effettuate (Figura 27).

Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una curva di dispersione sperimentale apparente per frequenze maggiori di 4-5 Hz e quindi fornisce informazioni sulla

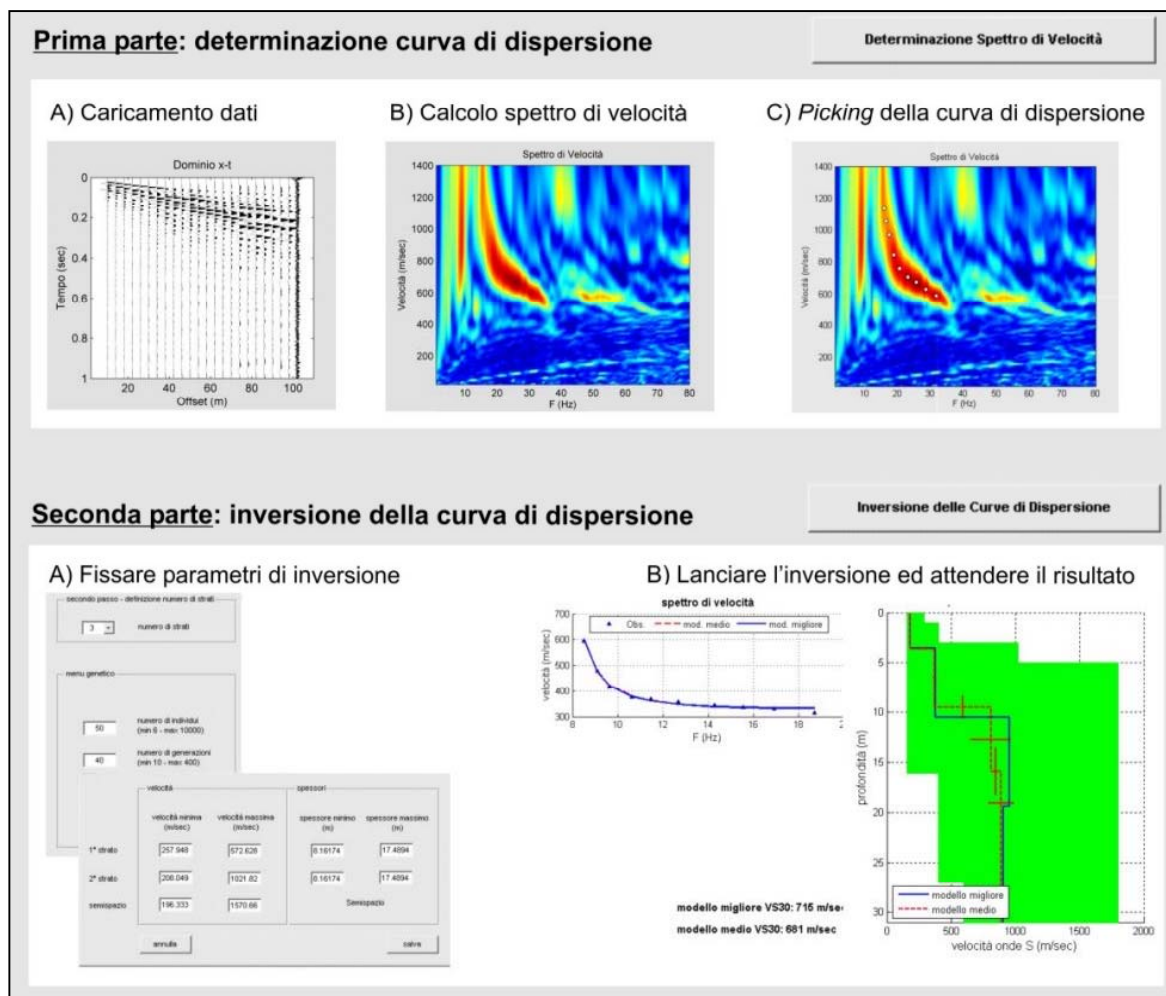


Figura 27 - Esempio di procedura di elaborazione di indagine MASW. L'analisi dei tre grafici superiori permette di determinare la curva di dispersione, mentre quelli inferiori mostrano la procedura per l'inversione della curva al fine di ottenere la distribuzione della velocità in funzione della profondità.

porzione più superficiale del sottosuolo (30-50 m). Il metodo passivo, invece, consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa in un intervallo più ampio (es. 0.1-10 Hz) e pertanto la profondità d'indagine è generalmente maggiore di 50 m.

5.3. Indagini cross-hole

Avendo a disposizione due fori di sondaggio relativamente vicini all'interno dei quali vengono installati, in uno, una sorgente sismica e, nell'altro, una serie di ricevitori, è possibile effettuare una prova sismica detta di *cross-hole*. Tale prova consiste nel misurare il tempo percorso dalle onde di volume P ed S dirette nel tragitto sorgente-ricevitori nella sezione di sottosuolo compresa fra i due fori di sondaggio (Figura 28). Conoscendo il tempo (t) e la distanza tra i sensori (d) è quindi possibile calcolare la velocità di propagazione delle onde (v) nel sottosuolo, tramite la semplice formula $v = d/t$.

Uno dei vantaggi di questa tecnica è che la velocità di propagazione delle onde sismiche è teoricamente misurabile a qualsiasi profondità. Al contrario, la maggiore limitazione di questo metodo è rappresentata dagli elevati costi di approntamento (realizzazione di almeno due fori di sondaggio) ed esecuzione della prova stessa. Anche questa tecnica viene utilizzata per il calcolo della v_{s30} .

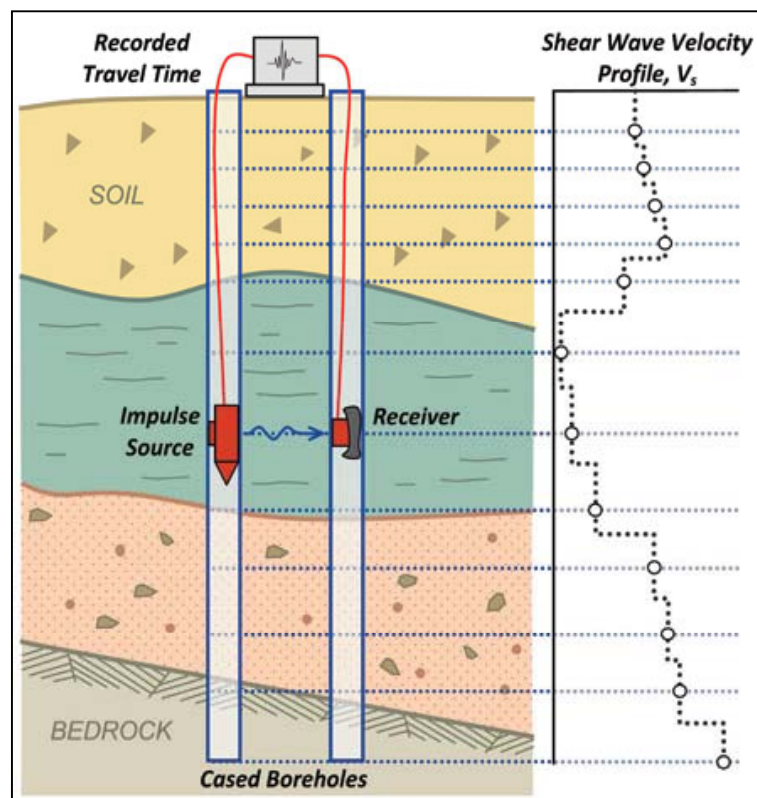


Figura 28 - Schema di esecuzione di un indagine *cross-hole* tra due fori.



5.4. Indagini sismiche passive in array ESAC

L'antenna sismica (o *array* sismico) consiste in una configurazione di sensori sismici (come geofoni o accelerometri) distribuiti secondo geometrie variabili nell'area di indagine (Okada, 2003). Le tecniche 'passive' sfruttano il rumore sismico ambientale (*noise*) con un contenuto in frequenza estremamente variabile (0.01-200 Hz). Al contrario delle metodologie 'attive', l'utilizzo di sorgenti passive consente di raggiungere profondità di esplorazione dell'ordine di alcune centinaia di metri. Queste tecniche, inoltre, sono particolarmente idonee ad essere applicate in aree urbane.

Le registrazioni di questo tipo di segnale effettuate dai singoli sensori vengono combinate mediante una tecnica chiamata ESAC (*Extended Spatial Auto-Correlation*; Okada, 2003) che mette in evidenza la coerenza di fase delle varie registrazioni.

Utilizzando opportune procedure di analisi è possibile ricavare da queste misure la curva di dispersione delle onde di Rayleigh. Dato che queste fasi sismiche campionano porzioni di sottosuolo via via maggiori al crescere del periodo dell'onda e che la loro velocità di fase è fortemente condizionata dalle velocità delle onde di volume (maggiormente dalle fasi S) nello strato campionato, la forma della curva di dispersione dipende dalle variazioni delle velocità delle onde di taglio con la profondità. Risulta quindi possibile stabilire una relazione fra la forma della curva di dispersione e la v_s nel sottosuolo.

In linea di principio non esistono limitazioni alla profondità di esplorazione di questo metodo di analisi, ma in realtà è stato riscontrato che la massima profondità di esplorazione è confrontabile con la lunghezza dello stendimento.

Nelle indagini eseguite durante questo lavoro di microzonazione sismica sono stati utilizzati 24 geofoni a tre componenti, con frequenza propria pari a 4.5 Hz, posizionati con distanza intergeofonica costante pari a 8 m secondo una configurazione geometrica 2D a forma di "L".

Di seguito sono riportati i profili di velocità delle onde di taglio ottenuti dall'elaborazione delle due indagini ESAC effettuate (Figura 29). Entrambi i profili di velocità sono caratterizzati da un incremento monotono e costante della velocità delle onde nel sottosuolo, fino a raggiungere valori attorno a 400-450 m/s tra 100 e 125 m di profondità.

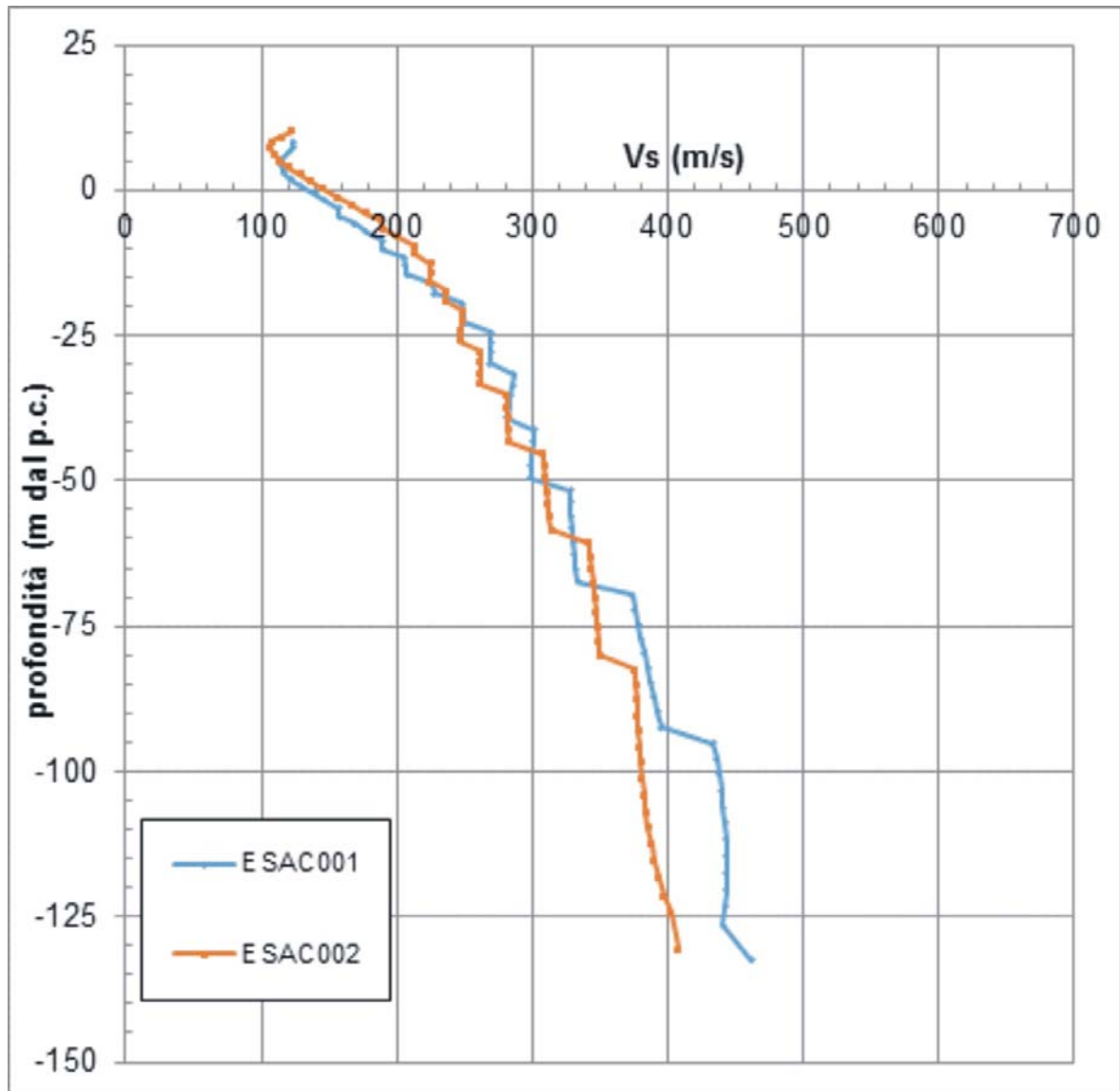


Figura 29 - Profili di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo del Comune di Sant'Agostino, ottenuti mediante misure in *array* tipo ESAC.



5.5. Indagini HVSR

Un metodo geofisico ampiamente diffuso negli ultimi anni è rappresentato dalla tecnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Esso è basato sulla registrazione del rumore sismico ambientale (*noise*), come per le MASW, ma a differenza del metodo geofisico precedentemente descritto, viene utilizzato un singolo strumento a tre componenti. Lo scopo di tale tecnica è quello di individuare le frequenze fondamentali di risonanza del terreno.

Nel percorso tra la sorgente e il sito di misura, le onde elastiche subiscono modificazioni come riflessioni, rifrazioni ed attenuazioni che dipendono dalle caratteristiche del sottosuolo. Quindi anche il debole *noise* ambientale, che tradizionalmente viene scartato dalla sismologia classica, in certe condizioni contiene informazioni relative al mezzo attraversato che possono essere estratte attraverso opportune tecniche (Castellaro *et al.*, 2005).

I metodi che utilizzano il *noise* si basano sul principio che un sito 'risponde' a tale tipologia di segnale, caratterizzato da un ampio intervallo di frequenze, così come risponderebbe all'input di un terremoto. La validità di questa assunzione è stata a lungo dibattuta nella comunità scientifica ed è largamente accettata oggi. Il metodo fu inizialmente proposto da Kanai (1957) il quale sosteneva che la distribuzione del contenuto in frequenza del rumore ambientale può essere usata per questo scopo in quanto gli effetti di amplificazione delle frequenze sono legati alle condizioni geologiche del sito. Tra le prime applicazioni va ricordata la cosiddetta tecnica di Kanai. Il metodo, proposto da Kanai e Tanaka (1961), si basava sull'osservazione di una forte somiglianza tra lo spettro di un evento sismico registrato in un dato sito ed il corrispondente spettro del *noise*.

Un'evoluzione del metodo è rappresentata dall'applicazione della tecnica HVSR, applicata da Nogoshi e Igarashi (1970) che consiste nel calcolo del rapporto spettrale tra le componenti orizzontale e verticale del moto. Il metodo fu in seguito reso popolare da Nakamura (1989).

La metodologia di Nakamura (1989) si basa sull'assunzione che il rumore sismico ambientale sia costituito in gran parte da onde di superficie (onde di Rayleigh) che si propagano in un singolo strato sovrastante un semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito (Figura 30). Il metodo assume inoltre che le

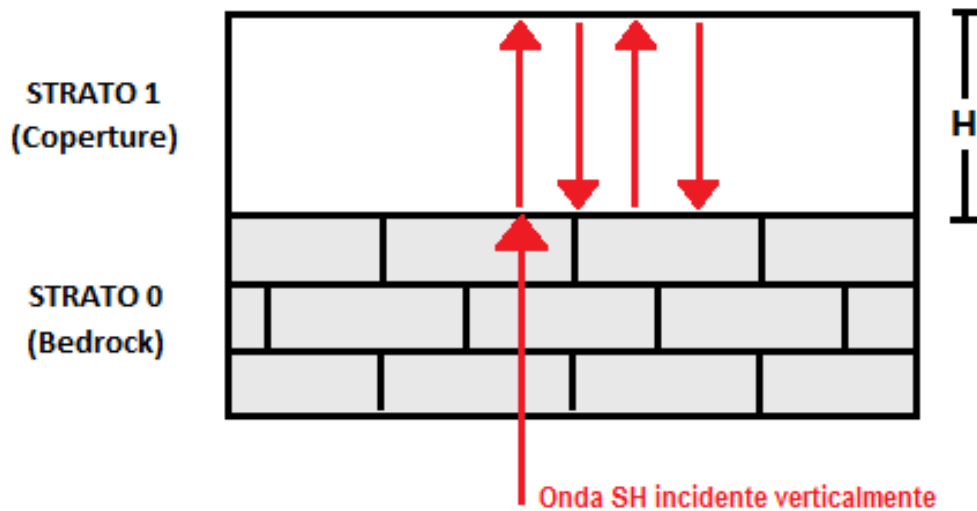


Figura 30 - Esempio di sistema monostrato sovrastante un substrato roccioso. Questo modello geologico semplificato è alla base del metodo HVSR.

sorgenti del *noise* siano locali e che la componente verticale del moto del suolo non risenta degli effetti di amplificazione locale causate dai sedimenti sovrastanti il substrato.

Nel dominio delle frequenze, le componenti del moto del suolo coinvolte sono quelle orizzontale $H_{s(\omega)}$ e verticale $V_{s(\omega)}$ alla superficie ($H_{s(\omega)}$ e $V_{s(\omega)}$), e le due analoghe corrispondenti ($H_{b(\omega)}$ e $V_{b(\omega)}$) alla base dello strato soffice. Per le assunzioni sopraelencate, il rapporto $R_{v(\omega)}$ fra le componenti verticali del moto in superficie ed alla base dello strato soffice, contenendo solo il termine di sorgente $A_{s(\omega)}$, permette di valutare gli effetti legati alla sorgente

$$R_{v(\omega)} = \frac{V_{s(\omega)}}{V_{b(\omega)}} = A_{s(\omega)} \quad [7]$$

Il rapporto $R_{h(\omega)}$ fra le componenti orizzontali del moto in superficie e alla base dello strato soffice (Figura 30), oltre che il termine di sorgente, contiene anche quello di amplificazione del sito $S_{s(\omega)}$

$$R_{h(\omega)} = \frac{H_{s(\omega)}}{H_{b(\omega)}} = A_{s(\omega)} * S_{s(\omega)} \quad [8]$$

Il rapporto tra $R_{h(\omega)}$ ed $R_{v(\omega)}$ consente quindi di ricavare la funzione degli effetti di sito:



$$\frac{R_{h(\omega)}}{R_{v(\omega)}} = \left[\frac{H_{s(\omega)}}{H_{b(\omega)}} \right] * \left[\frac{V_{b(\omega)}}{V_{s(\omega)}} \right] = S_{s(\omega)} \quad [9]$$

Da misure sperimentali eseguite da Nakamura registrando il microtremore in superficie ed a profondità crescenti in pozzo, è stato dimostrato che alla base dello strato soffice l'ampiezza spettrale delle componenti verticale ed orizzontale è uguale ($V_{b(\omega)} / H_{b(\omega)} = 1$)

La funzione degli effetti di sito $S_{s(\omega)}$ sarà quindi:

$$S_{s(\omega)} = \frac{H_{s(\omega)}}{V_{s(\omega)}} \quad [10]$$

Pertanto, attraverso il rapporto tra le componenti orizzontali e verticale del moto del suolo in superficie, è possibile ottenere una stima del fattore di amplificazione al sito. Inoltre, il picco, o i picchi, di frequenza eventualmente osservati rappresentano la frequenza fondamentale di risonanza degli strati sovrastanti il substrato roccioso.

Le basi teoriche del rapporto H/V sono relativamente facili da comprendere in un mezzo caratterizzato da uno strato omogeneo sovrastante il substrato roccioso (o strato assimilabile da un punto di vista meccanico). Se lo spessore del pacco di sedimenti al di sopra del substrato (H) è noto, ad esempio grazie alle informazioni fornite da sondaggi diretti, la frequenza di risonanza (f) dello stesso è legata alla velocità delle onde di taglio (v_s) attraverso la relazione

$$f = \frac{v_s}{4 \cdot H} \quad [11]$$

La frequenza di risonanza è inversamente proporzionale a $4 \cdot H$ perché un'onda che viene riflessa all'interfaccia strato omogeneo-substrato roccioso interagisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente λ è quattro volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H responsabile delle risonanze.

La valutazione della frequenza fondamentale di risonanza è estremamente importante perché influisce sulle sollecitazioni che subiscono le costruzioni, essendo queste dei sistemi oscillanti caratterizzati da un periodo proprio. Sotto l'azione di un terremoto anche una sequenza di strati si comporta come un oscillatore avente un periodo proprio, per cui l'azione di filtro e/o amplificazione esercitata dagli strati più superficiali costituisce il cosiddetto



effetto di sito, da cui dipenderà l'effettiva sollecitazione a cui saranno sottoposti i manufatti presenti in superficie.

La metodologia di Nakamura ha trovato applicazioni anche al di fuori della semplice valutazione della risposta di sito. Viene infatti utilizzata anche per la stima del periodo proprio di oscillazione degli edifici. Dividendo fra loro i rapporti spettrali H/V ricavati da registrazioni del rumore sismico ambientale eseguite nel piano più alto dell'edificio, con quelli relativi all'elaborazione delle registrazioni effettuate nel piano terra o scantinato, sarà possibile stimare la frequenza naturale del manufatto (f)

$$f = \frac{(H/V)_{\text{piano_superiore}}}{(H/V)_{\text{scantinato}}} \quad [12]$$

Conoscere la frequenza di risonanza del sottosuolo e degli edifici sovrastanti consente di valutare la possibile occorrenza della cosiddetta 'doppia risonanza' che si verifica quando le due frequenze coincidono. Questa condizione è particolarmente pericolosa perché, nel caso di una sollecitazione sismica, l'ampiezza delle oscillazioni tende ad aumentare sempre più fino al collasso dell'edificio.

La registrazione del microtremore presenta numerosi vantaggi; infatti, oltre ad essere totalmente non invasiva e molto rapida, non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazione esterne diverse dal rumore ambientale, che in natura esiste ovunque.





6. Raccolta dati per lo studio

In questo capitolo è descritta la procedura che è stata seguita per la raccolta, la georeferenziazione e l'archiviazione di tutti i dati geognostici, relativi al territorio del Comune di Sant'Agostino. Tale lavoro è stato effettuato partendo dalle informazioni preesistenti nella banca dati della Regione Emilia-Romagna, cercando successivamente in modo sistematico negli archivi dei professionisti che avevano operato nel territorio e raccogliendo numerosi nuovi dati geofisici.

Lo scopo principale di questa attività è quello di ricostituire l'archivio dei dati di sottosuolo per il Comune di Sant'Agostino che, in buona parte, era andato distrutto con la sequenza sismica del 2012 in quanto contenuto nei locali del Palazzo Comunale reso inagibile fin dalla prima scossa del 20 maggio.



6.1. Archivio preesistente

Per la prima fase del lavoro dedicata alla raccolta dati è stato presa in considerazione la banca dati geognostica curata e gestita dal Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna. A gennaio 2013, erano archiviate 339 prove relative all'intero territorio del Comune di Sant'Agostino. La Tabella 3 riporta una sintesi delle diverse indagini suddivise per tipologie archiviate in tale data nella suddetta banca dati.

Tutti questi dati erano e sono tuttora presenti e consultabili nella banca dati della Regione Emilia-Romagna mediante accesso al sito web dedicato (<http://geo.regione.emilia-romagna.it/geocatalogo/>) che permette di vedere e scaricare le informazioni relative ad ogni

tipologia	numero di prove	profondità raggiunta [m]
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	141	7-39
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica CPTE)	10	20-48
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)	35	20-40
Pozzi per acqua (PA)	49	9-180
Prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTu)	9	24-40
Sondaggi a carotaggio continuo (S)	70	5-67
Sondaggi a distruzione di nucleo (SD)	17	9-40
Cross-hole (F)	1	30
Misure di rumore ambientale a stazione singola (R)	7	n.d.

Tabella 3 - Numero di indagini, suddivise per tipologia, esistenti nella banca dati geognostica della Regione Emilia-Romagna a gennaio 2013, relative al territorio del Comune di Sant'Agostino.

singola prova (Figura 31). Per agevolare questo compito di raccolta, la Regione ha fornito, in forma elettronica, l'intero pacchetto dati.

Tutte le indagini ivi comprese rispettano i seguenti criteri: 1) sono localizzate con buona precisione sulla Carta Tecnica Regionale; 2) sono associate ad una descrizione litologica per pozzi e sondaggi e 3) presentano rapporti di prova completi per tutte le prove penetrometriche.

Inoltre, tutte le prove sono univocamente identificate da un codice di 10 cifre composto da:

- un numero di sei cifre identificativo della sezione della Carta Tecnica Regionale, in scala 1:10.000, nella quale ricade la prova;
- una lettera identificativa del tipo di indagine geognostica (*prefisso* in Tabella 4)
- un numero progressivo di tre cifre identificativo della prova all'interno della sezione CTR (*progressivo* in Tabella 4);

Nel caso in cui nello stesso sito siano presenti più prove, al suddetto codice si aggiunge un suffisso rappresentato da un lettera progressiva (da A a Z).

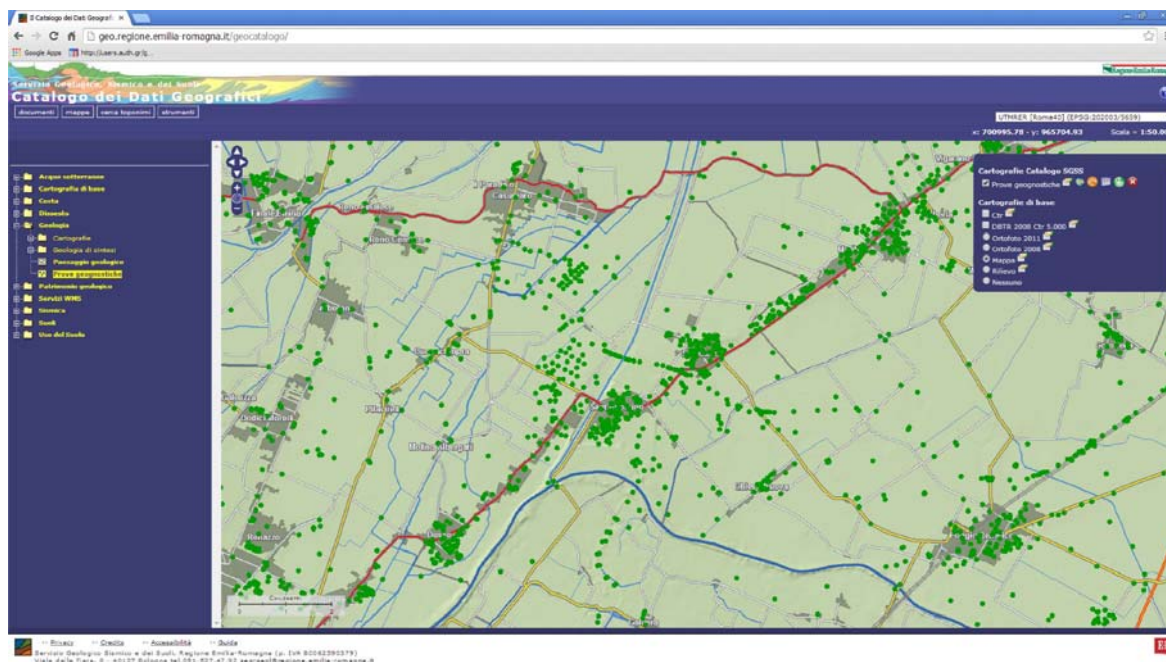


Figura 31 - Portale di accesso alla banca dati geognostici curata e gestita dalla Regione Emilia-Romagna(<http://geo.regione.emilia-romagna.it/geocatalogo/>). Esempio di zoomata sul Comune di Sant'Agostino. I puntini verdi indicano le prove geognostiche attualmente disponibili sul sito.



<i>prefisso</i>	
B	penetrometria statica con piezocono sismico
C	penetrometria statica con punta meccanica
E	penetrometria statica con punta elettrica
F	prova Cross-hole
J	prova MASW
N	array sismico
P	sondaggio o pozzo
R	misura di microtremore a stazione singola
U	penetrometria statica con piezocono
<i>progressivo</i>	
001-399	penetrometrie e sondaggi a distruzione
400-499	sondaggi a carotaggio continuo
500-599	sondaggi e penetrometrie eseguiti direttamente da RER
600-899	pozzi per acqua
<i>suffisso</i>	
A-Z	presenza di più indagini sulla stessa coordinata xy

Tabella 4 - Convenzione utilizzata per la composizione del codice identificativo delle singole indagini. Al numero (sei cifre) identificativo della sezione della Carta Tecnica Regionale, in scala 1:10.000, nella quale ricade la prova segue il *prefisso* (una cifra), il *progressivo* (tre cifre) ed eventualmente il *suffisso* (una cifra) nel caso in cui vi siano più prove con le stesse coordinate geografiche.



6.2. Ricerca nuovi dati da archivi

La seconda fase del lavoro di raccolta dati ai fini di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino è consistita nella raccolta di tutte le possibili informazioni relative a stratigrafia, litologia, caratteristiche geomeccaniche ed idrogeologiche del sottosuolo poco profondo, fino a qualche decina di metri, non presenti nella banca dati della Regione Emilia-Romagna. Tale lavoro è stato dedicato al recupero di copie integrali delle relazioni geologiche relative alle indagini effettuate nell'area di studio. Da un lato, infatti, la maggior parte di tale documentazione, anche se già consegnata agli uffici competenti del Comune, non era più disponibile a causa dell'inagibilità dell'archivio, dall'altro, fin dai primi mesi dagli eventi sismici del 2012 erano già state effettuate numerose nuove indagini geognostiche che, in molti casi, non erano ancora state consegnate al Comune.

Il lavoro di ricerca è stato svolto in modo sistematico presso i professionisti che hanno maggiormente operato sul territorio. In particolare, si coglie qui l'occasione per ringraziare nuovamente i seguenti colleghi e studi geologici professionali per la loro disponibilità ed il per il prezioso contributo che hanno voluto fornire:

- dott. geol. Enrico Taddia, dello studio geologico Demetra s.r.l. di Sant'Agostino;
- dott. geol. Emanuele Stevanin, dello studio geologico Synthesis s.r.l. di Copparo;
- ditta Elletipi s.r.l. di Ferrara;
- dott. geol. Corrado Ballotta, dello studio geologico Geohydrodata s.a.s. di Rovigo;
- dott. geol. Stefano Vincenzi, dello studio geologico Gaia s.r.l. di Bondeno;
- dott. geol. Biagio Tranquillo di Marzabotto;
- dott. geol. Massimiliano Plazzi, dello studio tecnico "Indagini geologiche ed ambientali, prevenzione incendi" di Ferrara;
- dott.ssa geol. Raffaella Maurizzi di Monterezeno.

Le indagini recuperate in queste fase sono complessivamente 277 prove, e la Tabella 5 riporta una sintesi dei dati così ottenuti suddivisi per tipologia. Tutte le prove sono state georeferenziate in ambiente GIS, mentre le informazioni (generali, stratigrafiche, litologiche e geotecniche) delle singole prove sono state inserite in un database in formato *Access*, predisposto dal Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna, attraverso una maschera



tipologia	numero prove	profondità raggiunta [m]
prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	218	8-32
prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)	30	13-40
pozzi per acqua (PA)	8	3.5-91
sondaggi a carotaggio continuo (S)	9	8-50
sondaggi a distruzione di nucleo (SD)	1	4
prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTu)	8	30-40
indagini MASW	3	30

Tabella 5 - Numero di indagini, suddivise per tipologia, recuperate durante la fase di raccolta dei nuovi dati presso studi di professionisti che hanno operato nel territorio comunale.

di visualizzazione che raggruppa i dati in tre sezioni. Tale modalità per l'inserimento dei dati è stata scelta al fine di facilitare la successiva introduzione delle nuove prove geognostiche nella banca dati della Regione Emilia-Romagna.

La prima sezione (Figura 32) comprende le informazioni di carattere generale sulla localizzazione dell'indagine, sulle modalità esecutive della prova, sulla provenienza, attendibilità e riservatezza del dato.

La seconda sezione (Figura 33) viene visualizzata solo per le indagini per cui è stata caricata una stratigrafia, mentre non compare per prove penetrometriche ed indagini sismiche. Le informazioni in quest'area si riferiscono alle singole unità lito-stratigrafiche attraversate

CTR	203020	PROGRESSIVO	P414	SIGLA	203020P414	COMUNE	SANT'AGOSTINO	Trova Prova Geognostica Pdf	
TIPO PROVA	carotaggio continuo		QUOTA	13.2	PROFONDITA'	40	COMMITTENTE		ANAS
AVANZAMENTO	carotaggio continuo		PROVA RER	TETTO GHIAIE	DITTA ESEC.	GEIMCO			
DATA ESECUZIONE	19/06/1989	RISERVATEZZA	pubblico	PRECISIONE UBICAZIONE	alta	PROPR. ARCHIVIO	STUDIO-GIGA		

Figura 32 - Prima sezione della maschera di visualizzazione per l'inserimento dei metadati nella banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna.



Figura 33 - Seconda sezione della maschera di visualizzazione per l'inserimento dei metadati nella banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna.

dall'indagine geognostica. Questi strati, che hanno caratteristiche relativamente omogenee, vengono descritti nei vari campi di questa area della maschera e nella successiva.

Infine, la terza sezione (Figura 34) contiene le informazioni litologiche dello specifico strato visualizzato ed è suddivisa in due finestre, a sinistra, la litologia dello strato e, a destra, la litologia delle intercalazioni. La litologia di uno strato può essere composta da un insieme di tipi litologici elementari. Nella finestra litologia dello strato vengono elencati tutti i tipi litologici elementari che costituiscono la litologia dello strato, seguendo l'ordine di abbondanza relativa. Nel caso in cui lo strato contenga delle intercalazioni litologiche, queste vengono descritte con le stesse modalità nella finestra litologia delle intercalazioni.

Contemporaneamente alla digitalizzazione per l'inserimento nella banca dati della Regione Emilia-Romagna, è stato anche prodotto un archivio cartaceo costituito dalle copie dei documenti originali recuperati per ciascuna prova, ed un archivio digitalizzato contenente le scansioni di quello cartaceo. Copia digitale del suddetto archivio è inclusa nell'Allegato A.

Figura 34 - Terza sezione della maschera di visualizzazione per l'inserimento dei metadati nella banca dati geognostici della Regione Emilia-Romagna.



6.3. Digitalizzazione prove penetrometriche

Al fine di poter sfruttare il contenuto numerico delle indagini penetrometriche per gli scopi di microzonazione, si è provveduto alla loro georeferenziazione e digitalizzazione. I parametri misurati delle 440 prove penetrometriche disponibili sono stati convertiti dal formato *raster* al formato numerico digitale, creando file *Excel* pronti per essere processati con il foglio di calcolo.

La procedura di digitalizzazione è stata metodologicamente differente a seconda dei casi. Ad ogni prova è stata quindi attribuita una 'classe' che indica il processo attraverso cui si è giunti al dato numerico (Figura 35). Le casistiche particolari sono molteplici, ma sono state distinte tre classi entro cui possono essere comprese tutte le prove:

classe 1 - Prove reperite già in formato tabellare numerico (.xls, .txt, .csv).

Procedura: copia e incolla dei valori di q_c ed f_s ;

classe 2 - Prove disponibili solo in formato grafico (q_c/f_s) da scansione (.pdf, .jpg).

Procedura: uso del *software* Engauge Digitizer, specifico per la digitalizzazione dei dati.

classe 3 - Prove disponibili in formato tabellare da scansione (.pdf, .jpg).

Procedura: Riconoscimento caratteri (OCR) e verifica o riscrittura;

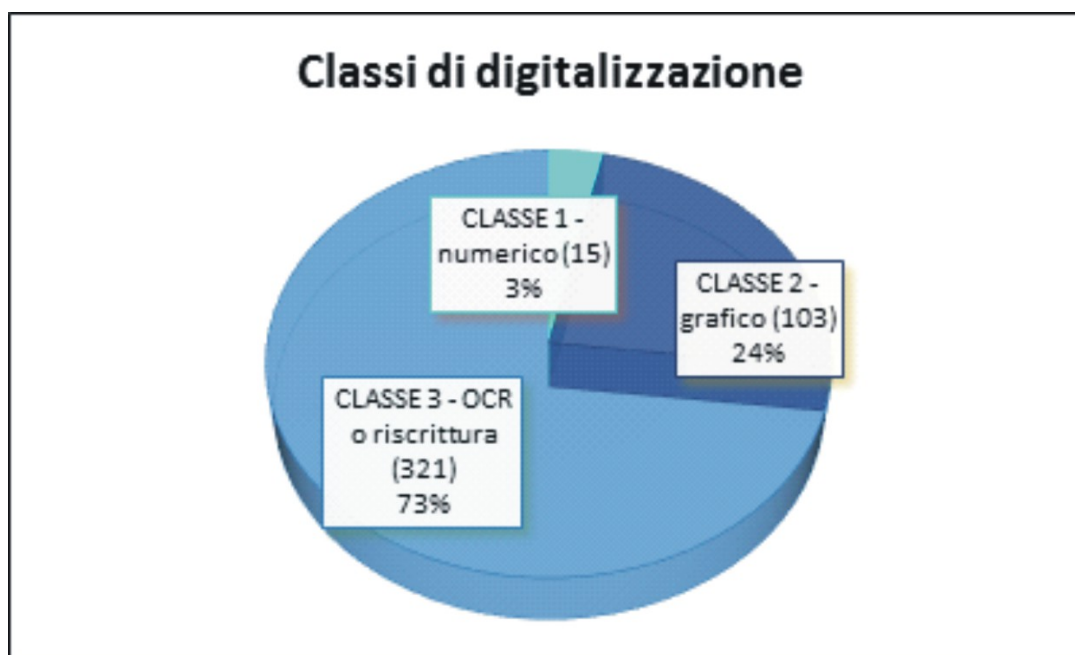


Figura 35 - Distribuzione delle prove penetrometriche in base alla classe di digitalizzazione.



Come si può notare dal diagramma di Figura 35, la stragrande maggioranza delle prove appartiene alla classe 3 e subordinatamente alla classe 2. Soltanto 15 prove erano già disponibili in formato numerico. Il lavoro svolto per ognuna di queste prove, soprattutto per quelle di classe 3, è stato pertanto particolarmente oneroso.

Una volta ottenuti i dati numerici, sono stati utilizzati diversi modelli di file *Excel*, con formule di conversione differenti a seconda del dato disponibile; si trovano infatti report PDF con incroci di diverse tipologie di unità di misura (ad esempio, MPa, MPa e kPa, kg/cm²) e valori da digitalizzare (ad esempio, q_c ed f_s , q_c e q_c/f_s oppure f_s e q_c/f_s).

Le diverse procedure di digitalizzazione del dato hanno prodotto, per ciascuna delle 440 prove penetrometriche, lo stesso tipo di file *Excel*.

La maggior parte delle indagini penetrometriche digitalizzate è di tipo statico con punta meccanica (CPT; Figura 36) ed inoltre più del 40% delle indagini raggiunge profondità superiori a 15 m dal piano campagna (Figura 37).

Non è stato possibile procedere alla digitalizzazione di tutte le 451 prove penetrometriche in quanto sono state scartate:

- due penetrometrie statiche con punta meccanica CPT alle quali non è associato il rapporto di prova (203010C095A, 203010C095B);

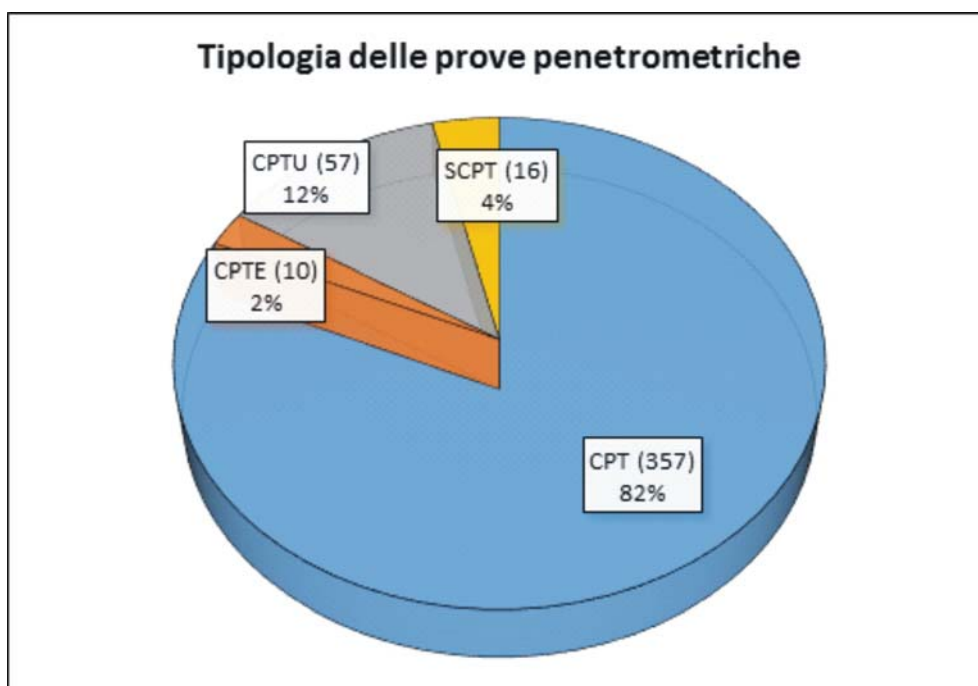


Figura 36 - Distribuzione delle prove penetrometriche in base alla tipologia di indagine.

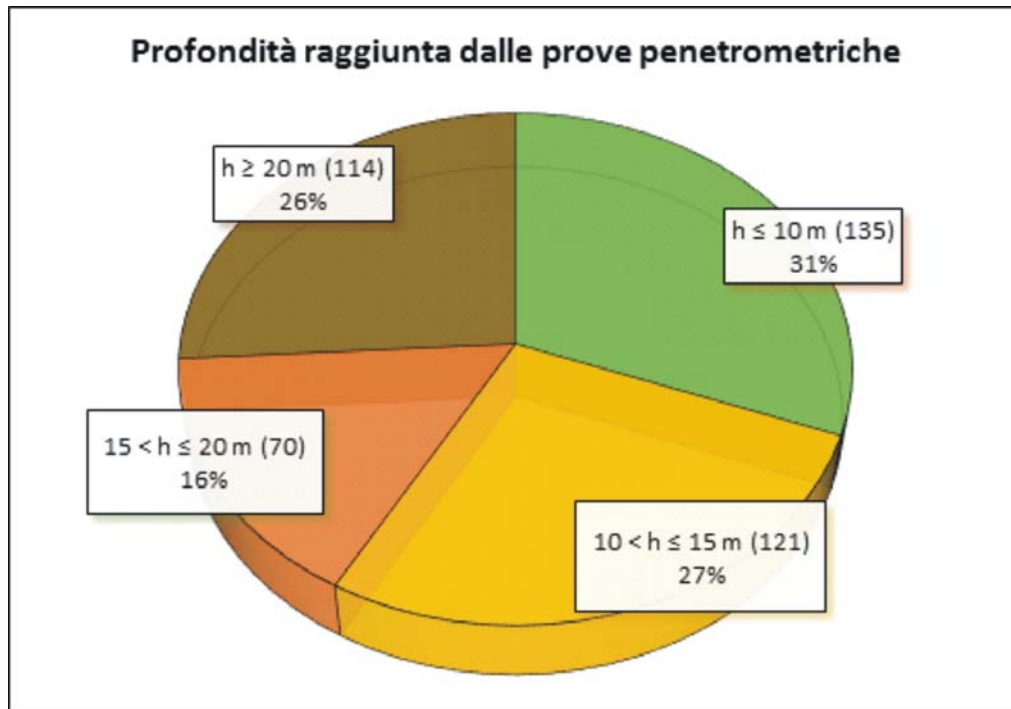


Figura 37 - Distribuzione delle prove penetrometriche in base alla profondità di indagine.

- otto penetrometrie statiche con piezocono CPTu (203010U003, 203010U004, 203010U994, 203010U995, 203010U996, 203010U997, 203010U998, 203010U999) ed una penetrometria statica con piezocono sismico SCPTu (185130B997), i cui grafici sono difficilmente convertibili in formato digitale.

4. Raccolta nuovi dati geofisici

Per le finalità del presente studio di microzonazione sono state effettuate numerose misure di rumore sismico ambientale mediante la tecnica HVSR descritta nel paragrafo 5.6. Al fine di garantire un'omogenea distribuzione delle indagini su tutto il territorio comunale, le misure sono state pianificate e realizzate, laddove possibile, a distanze pari o inferiori a 500 m le une dalle altre. La Figura 38 mostra la distribuzione delle misure effettuate ad agosto 2014.

La strumentazione utilizzata consiste in un tromografo digitale della serie Tromino 3G (www.tromino.eu), prodotto dalla ditta Micromed spa, progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico ambientale. Si tratta di un apparecchio portatile dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente.

Al fine di garantire un buon accoppiamento tra i sensori ed il terreno, si è provveduto allo scavo di una piccola buca nella quale è stato inserito lo strumento, così come raccomandato dalle linee guida del progetto di ricerca Europeo SESAME (*Site EffectS*

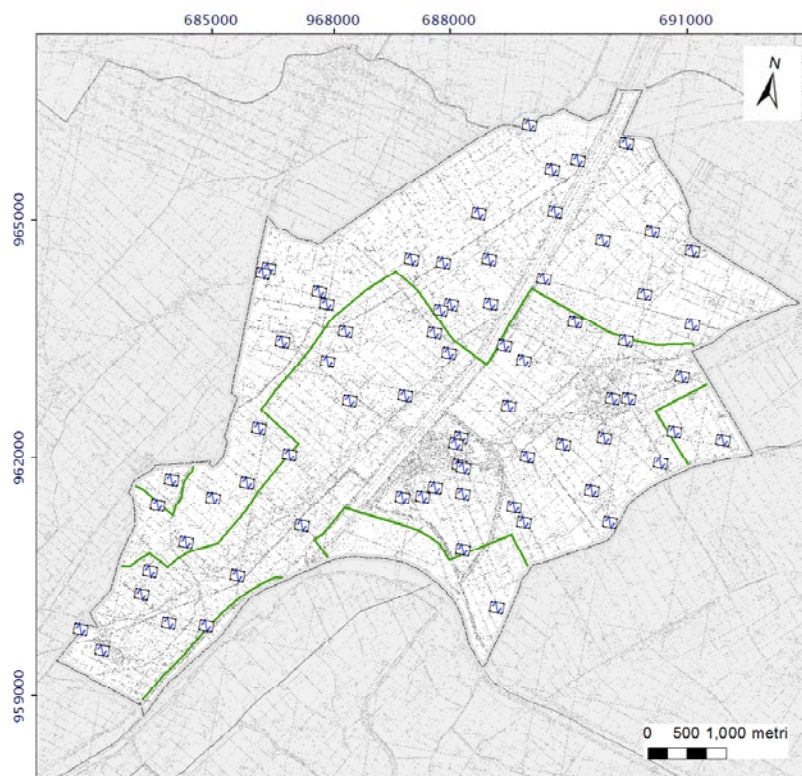


Figura 38 - Distribuzione delle misure di rumore ambientale sismico effettuate mediante la tecnica HVSR (aggiornamento ad agosto 2014).



assessment using Ambient Excitations, 2005). Per maggiori dettagli sulle linee guida, criteri di affidabilità delle curve HVSR e di significatività del picco di risonanza secondo SESAME (2005), si veda l'Allegato B.

Dato che le condizioni del sito (vicinanza ad edifici o alberi, reti viarie, ecc.) e quelle atmosferiche (vento, bassa pressione, ecc.) possono influenzare il risultato dell'indagine, per ciascun sito di misura è stato compilato un registro di campagna ed ogni rapporto di prova è fornito di documentazione fotografica.

Il segnale è stato acquisito alla frequenza di 256 Hz, con tempi di registrazione pari a 30 minuti per 71 misure e di 24 minuti per una misura. La scelta del tempo di registrazione è dettata dalle basse frequenze che si intendono indagare, possibilmente inferiori ad 1 Hz (SESAME, 2005; ICMS 2008).

L'elaborazione dei segnali è stata realizzata attraverso il *software* proprietario Grilla, in dotazione con lo strumento. Le analisi sono state effettuate in un intervallo di frequenze

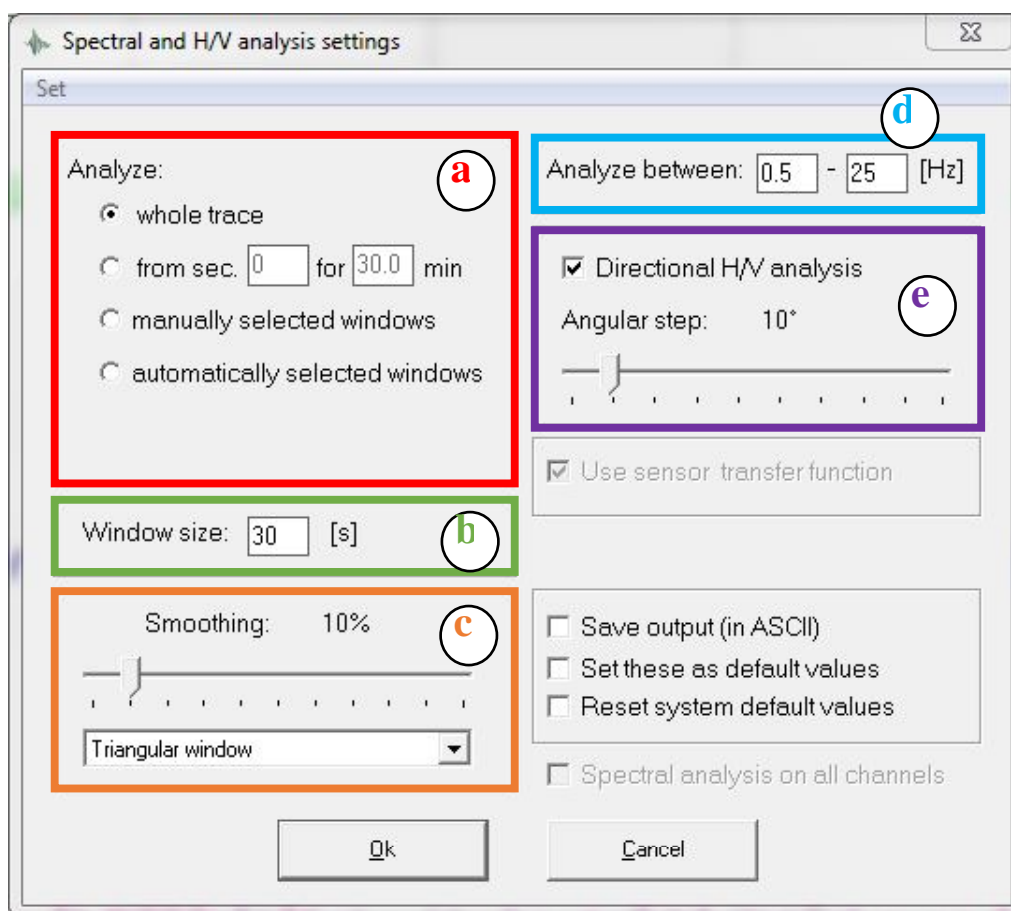


Figura 39 - Esempio di videata tratta dal programma Grilla che mostra il settaggio dei parametri necessari per elaborare il segnale acquisito in campagna.



compreso tra 0.5 e 25 Hz, così da fornire informazioni utili sia dal punto di vista geologico che alla progettazione ingegneristica (Castellaro, 2012; SESAME, 2005).

Per ciascuna misura, il *software* Grilla consente di (Figura 39) a) effettuare l'analisi sull'intera registrazione o su porzioni di essa; b) selezionare la lunghezza temporale delle finestre in cui verrà suddivisa la registrazione e per ciascuna delle quali sarà calcolato il rapporto spettrale HVSR; c) scegliere il tipo e la percentuale di lisciamiento (*smoothing*) da applicare ad ogni finestra; d) selezionare l'intervallo di analisi, in termini di frequenza; e) effettuare l'analisi di direttività della curva HVSR, per valutare la presenza o assenza di direzionalità nella sorgente del *noise*. Per maggiori dettagli sulla procedura di analisi del segnale si veda l'Allegato B dove sono riportati anche tutti i rapporti di prova.

L'analisi dell'andamento del rapporto spettrale alle diverse frequenze ha permesso di individuare i picchi di H/V per ciascuna misura. Il valore di f_0 del picco significativo a più bassa frequenza, corrisponde alla frequenza di risonanza fondamentale del sito.

Dato che l'ampiezza del rapporto H/V a basse frequenze (indicativamente al di sotto di 0.5 Hz) è particolarmente influenzata dalle condizioni meteorologiche (Castellaro e Mulargia, 2007), nei rari casi in cui il picco principale risulti a frequenze inferiori a 0.5 Hz e sia contemporaneamente presente un picco anche a frequenze superiori, sia pur di minor ampiezza, quest'ultimo è stato considerato come frequenza fondamentale.

La "Carta delle frequenze naturali del terreno" (Tavola.7 in Allegato D) e la Tabella 5 evidenziano come le frequenze di risonanza all'interno del territorio comunale siano comprese in un intervallo che varia da 0.88 Hz a 0.5 Hz. I valori più elevati si riscontrano in corrispondenza dell'abitato di San Carlo e più in generale nel settore NE, al confine con il Comune di Mirabello. Le frequenze minori, invece, inferiori a 0.6 Hz si individuano a S-SE di Sant'Agostino e nel settore occidentale, al confine con il Comune di Cento.

Valori di frequenza intermedi compresi tra 0.6 Hz e 0.8 Hz caratterizzano le porzioni centrali e sud-occidentali del territorio comunale, ed in particolare gli abitati di Sant'Agostino e Dosso.

Disponendo dei valori di velocità delle onde di taglio nei primi 100-150 m dalle misure ESAC e grazie alla relazione che correla la frequenza di risonanza con lo spessore della copertura sovrastante il substrato, è stata stimata la profondità dell'orizzonte risonante che risulta compresa in un intervallo tra 90 m ($f_0 > 0.88$ Hz) e 150 m ($f_0 < 0.6$ Hz) dal piano campagna.



Tabella 5 - Misure HVSR effettuate nel Comune di Sant'Agostino.

N	codice	lat.	lon.	data	durata [min]	f_0 [Hz]	ampiezza
1	SA_0023	44.8069	11.4240	02/07/2013	30	0.81	3.1
2	SA_0024	44.8004	11.4321	02/07/2013	30	0.88	2.7
3	SA_0025	44.7968	11.4226	02/07/2013	30	0.81	2.5
4	SA_0028	44.7886	11.3820	03/07/2013	30	0.66	2.7
5	SA_0029	44.7837	11.3929	03/07/2013	30	0.50	2.6
6	SA_0030	44.7862	11.4010	03/07/2013	30	0.63	2.5
7	SA_0031	44.7914	11.4114	04/07/2013	30	0.78	2.3
8	SA_0032	44.7776	11.3997	04/07/2013	30	0.59	2.3
9	SA_0034	44.7940	11.3574	04/07/2013	30	0.72	2.9
10	SA_0036	44.7854	11.3517	04/07/2013	30	0.59	3.0
11	SA_0037	44.7760	11.3432	04/07/2013	30	0.63	2.7
12	SA_0038	44.7707	11.3535	04/07/2013	30	0.69	2.8
13	SA_0039	44.7683	11.3335	04/07/2013	30	0.72	2.8
14	SA_0040	44.8033	11.4134	17/07/2013	30	0.88	2.4
15	SA_0041	44.8114	11.4056	17/07/2013	30	0.75	2.6
16	SA_0042	44.8212	11.4081	17/07/2013	30	0.81	2.6
17	SA_0043	44.8157	11.4161	17/07/2013	30	0.81	2.3
18	SA_0044	44.8216	11.4227	17/07/2013	30	0.81	2.3
19	SA_0046	44.8121	11.3916	17/07/2013	30	0.70	3.0
20	SA_0049	44.8027	11.3669	21/10/2013	30	0.78	3.0
21	SA_0050	44.8057	11.3860	21/10/2013	30	0.66	2.9
22	SA_0053	44.8042	11.3591	22/10/2013	30	0.66	3.0
23	SA_0056	44.8159	11.3778	23/10/2013	30	0.75	3.7
24	SA_0061	44.8062	11.3983	23/10/2013	30	0.84	2.7
25	SA_0062	44.8006	11.4241	11/12/2013	30	0.78	2.4
26	SA_0067	44.7964	11.3900	11/12/2013	30	0.69	2.5
27	SA_0068	44.7997	11.3955	11/12/2013	30	0.69	2.5
28	SA_0069	44.8101	11.4142	11/12/2013	30	0.81	2.9
29	SA_0073	44.7836	11.3430	12/12/2013	30	0.59	2.8



30	SA_0075	44.8125	11.3552	12/12/2013	30	0.63	3.0
31	SA_0076	44.8093	11.3654	12/12/2013	30	0.59	3.0
32	SA_0077	44.8106	11.3638	12/12/2013	30	0.56	2.5
33	SA_0079	44.8327	11.4097	13/12/2013	30	0.63	2.7
34	SA_0080	44.8231	11.4159	13/12/2013	30	0.72	2.6
35	SA_0081	44.8159	11.3995	13/12/2013	30	0.66	2.8
36	SA_0082	44.8160	11.3831	13/12/2013	30	0.72	3.0
37	SA_0083	44.8285	11.3983	13/12/2013	30	0.63	2.7
38	SA_0084	44.8237	11.3998	13/12/2013	30	0.78	2.6
39	SA_0085	44.8036	11.4159	25/02/2014	30	0.88	3.0
40	SA_0086	44.7892	11.4159	25/02/2014	30	0.63	2.3
41	SA_0094	44.7973	11.4066	25/02/2014	30	0.63	2.5
42	SA_0095	44.7956	11.3894	25/02/2014	30	0.63	2.3
43	SA_0096	44.7987	11.3713	26/02/2014	30	0.81	3.2
44	SA_0097	44.7915	11.3629	26/02/2014	30	0.72	2.8
45	SA_0100	44.8069	11.3822	26/02/2014	30	0.69	2.6
46	SA_0101	44.8223	11.3876	26/02/2014	30	0.81	2.5
47	SA_0104	44.8131	11.4245	11/03/2014	30	0.81	2.5
48	SA_0105	44.8066	11.3936	11/03/2014	30	0.75	2.5
49	SA_0106	44.7931	11.3903	11/03/2014	30	0.72	2.0
50	SA_0107	44.7929	11.3910	11/03/2014	30	0.72	2.1
51	SA_0108	44.7888	11.3863	11/03/2014	30	0.72	2.0
52	SA_0110	44.7890	11.3851	11/03/2014	30	0.72	2.3
53	SA_0111	44.7991	11.3786	11/03/2014	30	0.78	2.7
54	SA_0113	44.7732	11.3424	11/03/2014	30	0.69	2.6
55	SA_0114	44.8088	11.3822	12/03/2014	30	0.72	2.8
56	SA_0116	44.8118	11.3544	12/03/2014	30	0.56	2.9
57	SA_0117	44.8331	11.3936	12/03/2014	30	0.72	2.8
58	SA_0118	44.7704	11.3475	12/03/2014	30	0.69	2.9
59	SA_0119	44.7661	11.3374	12/03/2014	30	0.63	2.4
60	SA_0121	44.7987	11.4129	20/03/2014	30	0.69	2.7
61	SA_0123	44.8172	11.3903	20/03/2014	30	0.63	2.8
62	SA_0124	44.8299	11.4023	20/03/2014	30	0.56	2.6



63	SA_0125	44.8113	11.3853	20/03/2014	30	0.56	2.8
64	SA_0128	44.8064	11.3690	20/03/2014	30	0.63	2.9
65	SA_0131	44.7953	11.4011	21/03/2014	24	0.72	2.4
66	SA_0133	44.7893	11.4001	21/03/2014	30	0.56	2.6
67	SA_0134	44.7900	11.3916	21/03/2014	30	0.63	2.6
68	SA_0136	44.7837	11.3665	21/03/2014	30	0.66	2.8
69	SA_0137	44.7755	11.3563	21/03/2014	30	0.63	2.6
70	SA_0138	44.7799	11.3483	21/03/2014	30	0.63	2.8
71	SA_0140	44.7867	11.3446	21/03/2014	30	0.59	2.5
72	SA_0141	44.7877	11.3568	21/03/2014	30	0.63	3.2

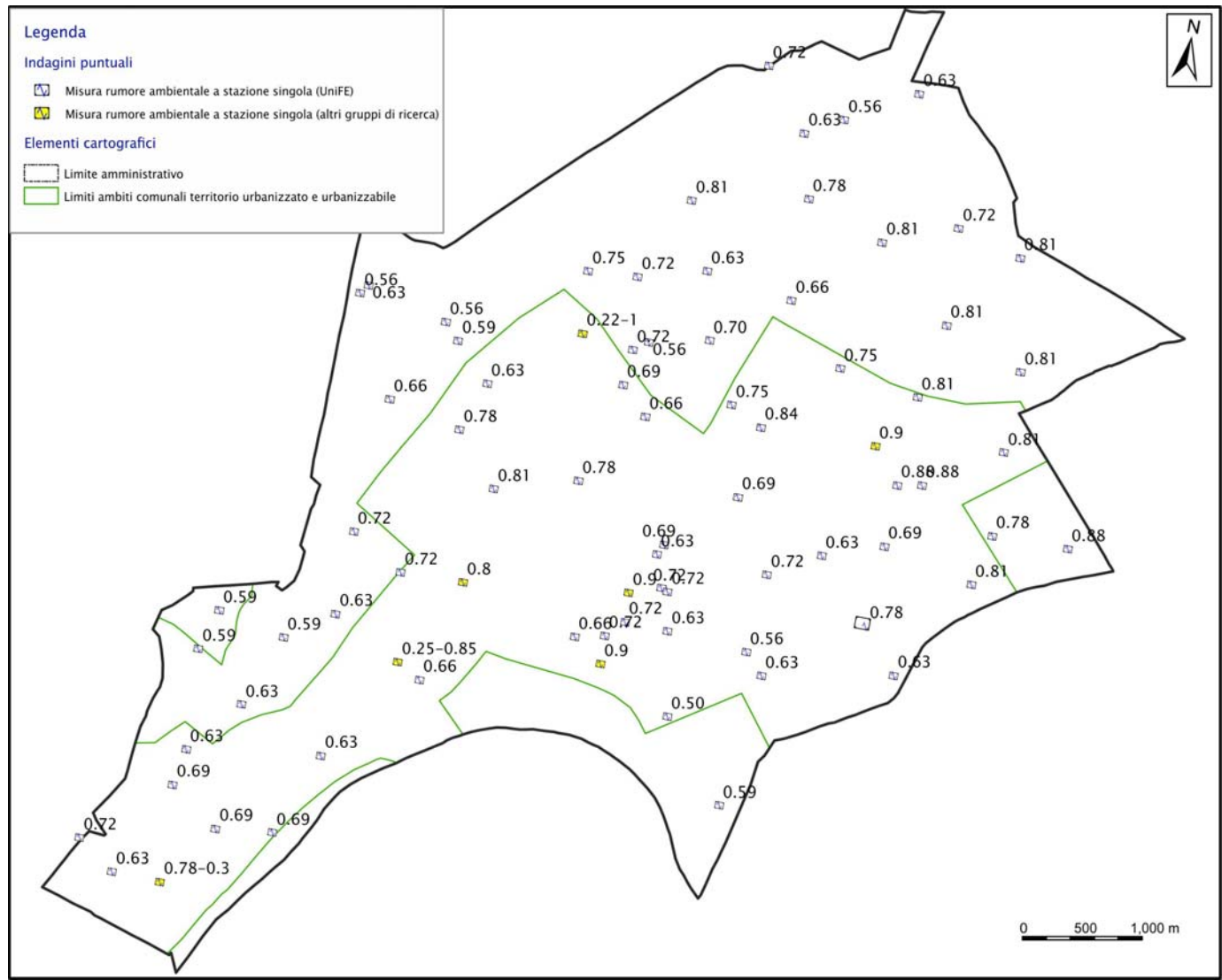


Figura 40 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 7 (Allegato D) "Carta delle frequenze naturali del terreno"





6.5. Sintesi dati disponibili

La fase di raccolta di nuovi dati è stata particolarmente importante perché ha consentito di incrementare notevolmente il numero di indagini disponibili per il Comune di Sant'Agostino, come evidente dalla Figura 41. Inoltre la Tabella 6 riporta una sintesi dei dati disponibili, suddivisi per tipologia.

Grazie al lavoro di integrazione dell'archivio pregresso e della raccolta di nuovi dati, sono stati aggiunti complessivamente oltre 350 nuovi punti corredati di relativi metadati. Ciò permetterà alla Regione Emilia-Romagna di aggiornare la propria banca dati. Tutte le indagini geognostiche e geofisiche presenti nella nuova banca dati relativa al territorio comunale di Sant'Agostino sono rappresentate nella Tavola 1 (Allegato D) "Carta delle indagini", rappresentata ad una scala ridotta in Figura 42.

In aggiunta a quanto indicato nella Tabella 6, sono stati recuperati anche i dati relativi a prove effettuate nei comuni limitrofi, fino ad una distanza di 500 m dal confine del Comune di Sant'Agostino. La raccolta e l'utilizzo di queste indagini 'esterne' al territorio comunale ha permesso di meglio caratterizzare alcune aree dove le prove erano numericamente e/o qualitativamente carenti e comunque di meglio vincolare l'interpretazione.

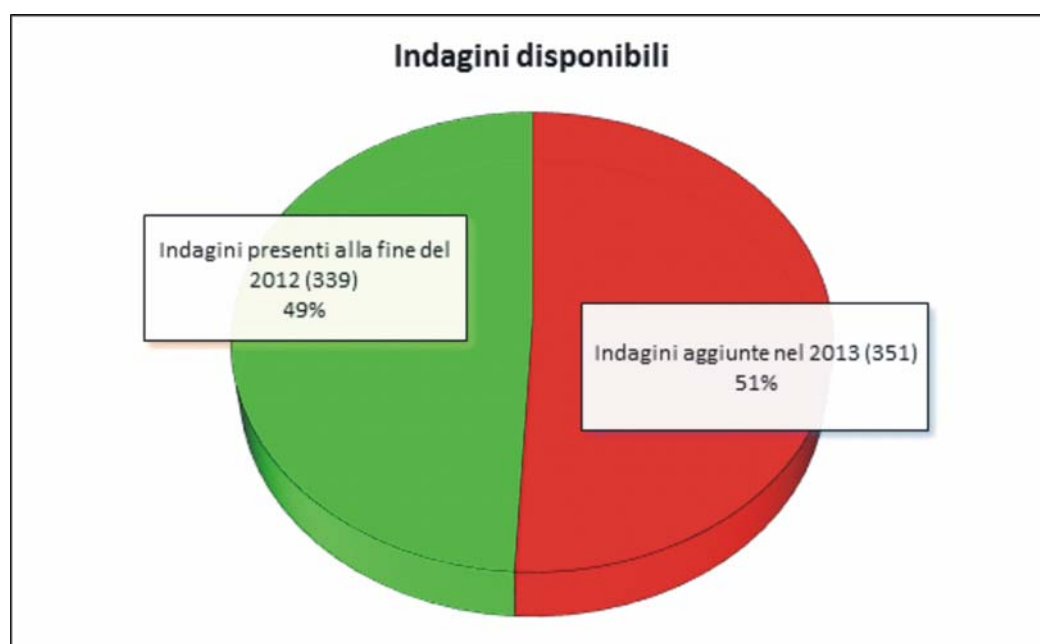


Figura 41 - Confronto fra dati preesistenti e nuovi dati raccolti durante il presente lavoro di microzonazione sismica.



tipologia	numero	profondità raggiunta [m]
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	359	7-39
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPE)	10	20-48
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)	65	13-40
Pozzi per acqua (PA)	57	3.5-180
Sondaggi a carotaggio continuo (S)	79	5-67
Prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTu)	17	24-40
Sondaggi a distruzione di nucleo (SD)	18	9-40
Indagine Cross-hole (F)	1	30
Misure di rumore ambientale a stazione singola (R)	79	n.d.
Indagini di sismica passiva ESAC	2	ca. 150
Indagine MASW	3	30

Tabella 6 - Distribuzione dei dati contenuti nella nuova banca dati del Comune di Sant'Agostino suddivisi secondo tipologia.

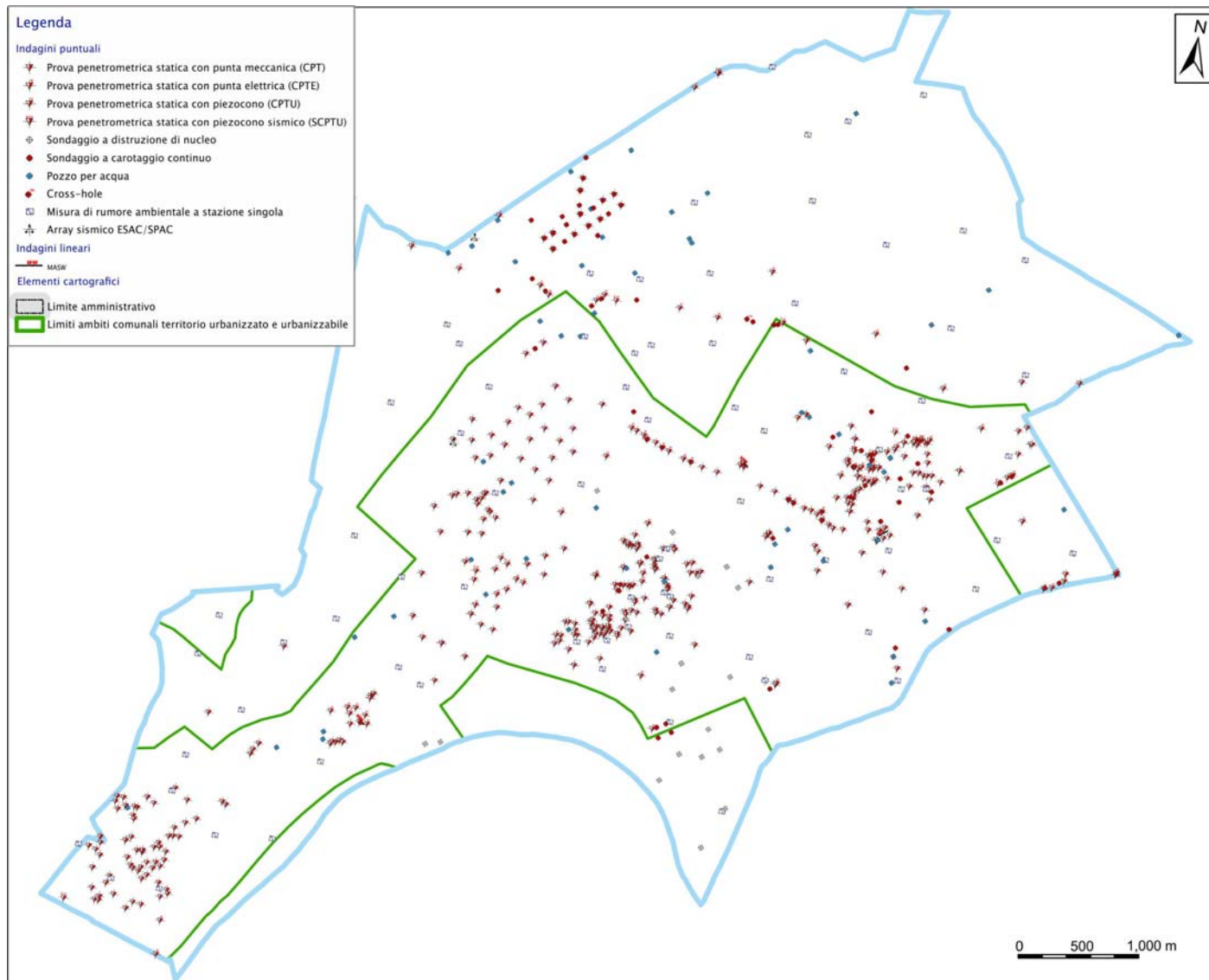


Figura 42 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 1 (Allegato D) "Carta delle indagini"





Parte terza

-

Analisi dei dati





7. Geologia di superficie

Sulla base di tutti i dati descritti nei capitoli precedenti, sia di natura puntuale, come le indagini geotecniche e geofisiche, che di natura areale, come le informazioni tettoniche, morfologiche, sedimentologiche e paleogeografiche, è stato possibile effettuare una serie di interpolazioni areali ed interpretazioni relative alla geologia di superficie del territorio di Sant'Agostino. In particolare, per le finalità del presente studio di microzonazione sismica, sono state prodotte tre mappe alla scala 1:10.000 (Allegato D): una geologica, intesa come distribuzione in superficie delle diverse tipologie di sedimenti. Un'altra di tipo geologico-tecnica, che permette di rappresentare la distribuzione dei diversi depositi superficiali in termini di caratteristiche litotecniche. La terza, infine, relativa al potenziale di liquefazione dei terreni nei primi 20 m.



7.1. Carta geologica dei sedimenti affioranti

Lo scopo della Carta geologica di superficie (Tavola 2 in Allegato D) è quello di rappresentare le litologie presenti in superficie, sulla base del meccanismo e del contesto deposizionale. Detta carta tematica è stata sintetizzata combinando in modo critico le diverse informazioni disponibili tenendo opportunamente conto del loro grado di attendibilità. Le principali fonti di informazione utilizzate sono state ottenute a) a partire dalla litologia prevalente, nei primi metri dal piano campagna, da prove penetrometriche, pozzi e sondaggi; b) dal Modello Digitale del Terreno (DTM) gentilmente fornito dal Servizio Geologico delle Regione Emilia-Romagna; c) dall'analisi di immagini satellitari; d) da rilievi sul campo.

Il modello digitale del terreno utilizzato è stato ottenuto a partire da un rilievo LIDAR (*Light Detection and Ranging*), che è una tecnica attiva per l'esecuzione di rilievi topografici ad alta risoluzione. Il sistema per l'acquisizione dei dati LIDAR è costituito da:

- mezzo aereo dotato di laser scanner che invia un impulso laser ad alta frequenza verso la superficie e da un sensore che registra l'intensità del segnale riflesso e la quota del terreno, in termini di differenza di tempo intercorsa tra il segnale emesso e quello riflesso;
- sistema satellitare (GPS) e sistema inerziale di navigazione (INS) installati a bordo, per determinare la posizione (x, y) e l'orientamento del mezzo aereo istante per istante;
- stazioni GPS a terra per correggere la posizione dell'aereo in fase di processamento dei dati.

A causa della presenza di edifici e della vegetazione si osserva un ritorno multiplo del segnale, e quindi una nuvola di punti che opportunamente filtrata permette di ottenere il modello digitale del terreno.

La Figura 43 mostra il modello digitale del terreno di Sant'Agostino. Questo tipo di immagini sono di fondamentale importanza per studiare la topografia di un territorio pianeggiante, come quello in questione. In particolare, il territorio comunale è caratterizzato da una morfologia piuttosto regolare, con quote variabili tra 8 e 16 m s.l.m. L'unico rilievo presente è costituito dal corpo arginale del paleo Reno, che si sviluppa in direzione NE-SW, e da quello del Reno attuale, che delimita l'andamento meridionale del limite amministrativo.

Questo elemento morfologico corrisponde ad un corpo sedimentario accumulatosi durante l'attività di un ramo ormai abbandonato del fiume Reno. Tale ramo del fiume si è formato durante il Medioevo ed è restato attivo fino alla fine del XVIII secolo quando il corso del Reno è stato deviato verso mare, a sud di Sant'Agostino, lungo il suo alveo attuale (Cibin e Segadelli, 2009).

Il Reno defluisce dagli Appennini settentrionali ed è particolarmente ricco di carico sedimentario, tanto che è in grado di registrare la presenza di gradienti laterali, prodotti sia da fenomeni di compattazione differenziale (Carminati *et al.*, 2003) sia dall'attività tettonica persistente di questo settore dell'Appennino settentrionale sepolto. L'apporto sedimentario elevato ed i forti tassi di subsidenza sia regionale sia in corrispondenza con le strutture

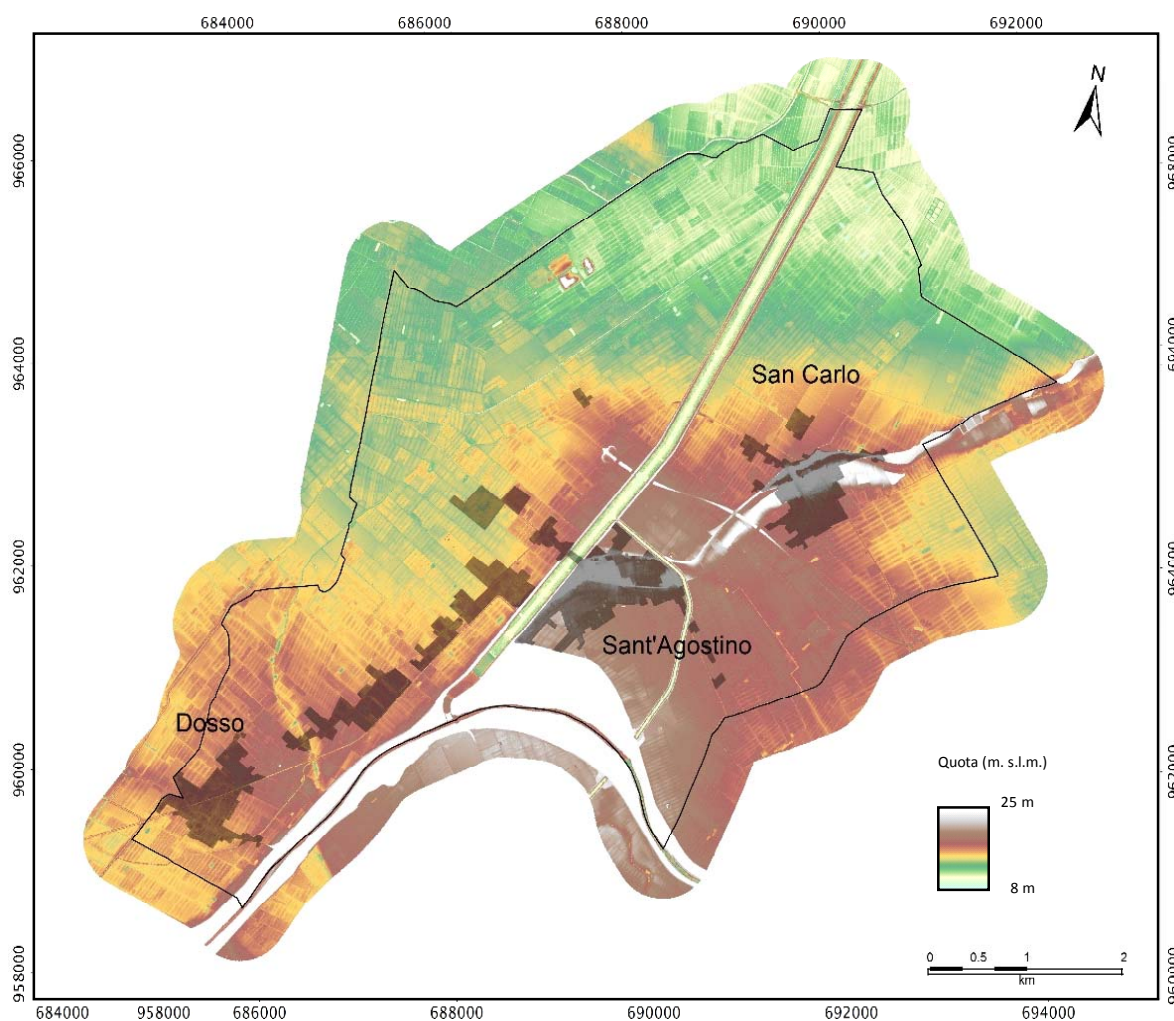


Figura 43 - Modello digitale del terreno del Comune di Sant'Agostino. In grigio gli agglomerati urbani.



sinclinaliche sepolte sono stati responsabili di importanti tassi di sedimentazione locale e di frequenti variazioni nell'assetto del sistema di drenaggio. In particolare, l'evoluzione idrografica è largamente documentata da fonti storiografiche (Bondesan, 1989; MURST, 1997a, Castiglioni *et al.*, 1999). A partire dalla fine del Medioevo e fino al tardo XVIII secolo, il Reno non era in grado di raggiungere il Mare Adriatico e nemmeno di sfociare direttamente nel Fiume Po, che scorreva circa 10 km a nord. Questa situazione ha quindi favorito la formazione nell'entroterra di ampie paludi e laghi (Bondesan, 1989). L'evoluzione deposizionale del territorio è stata scandita dalla costruzione fallimentare di innumerevoli opere di arginatura e da interventi di bonifica, che hanno determinato l'andamento quasi rettilineo del paleo Reno. Nonostante tutti gli sforzi, alla fine del XVIII secolo è stato deciso di deviare verso est il corso del fiume, per permettergli di raggiungere il mare attraverso un preesistente canale distributore del Fiume Po (Po di Primaro) (Cremonini, 1988). L'antico corso si è così progressivamente prosciugato, preservando comunque i suoi caratteri morfologici, soltanto localmente obliterati dalle attività antropiche.

Le zone morfologicamente rilevate corrispondono quindi a corpi sedimentari arginali formatesi perlopiù durante il medioevo. Fin da subito furono evidenti diversi vantaggi per la loro urbanizzazione e per il contestuale sviluppo della rete stradale. I corpi sabbiosi di argine, infatti, sono caratterizzati da ottime proprietà geotecniche (in condizioni statiche) per la costruzione di edifici e soprattutto sono sopraelevati rispetto alla circostante campagna evitando così eventuali allagamenti dovuti ad esondazioni dei corsi d'acqua o forti precipitazioni.

D'altra parte, come reso evidente ai più in concomitanza del terremoto del 20 maggio, i corpi sabbiosi saturi in acqua sono propensi alla liquefazione. Inoltre, poiché le creste dei paleo argini si trovano fino a 5 m più in alto rispetto alle depressioni interfluviali circostanti, sono presenti elevati gradienti topografici che, in caso di liquefazione diffusa, possono giocare un ruolo fondamentale nei fenomeni di espansione laterale (*lateral spreading*).

Nella Tavola 2 (Allegato D) "Carta geologica di superficie", sono distinti i sedimenti messi in posto dal Reno storico (ed eventualmente di altri corsi d'acqua appenninici) rispetto a quelli del corso attuale. In particolare, per i primi è stato possibile riconoscere e distinguere le seguenti litologie: i) limi sabbiosi di riempimento di canale fluviale appenninico, ii) sabbie e subordinatamente limi di riempimento di canale fluviale, iii) sabbie limose di riempimento di canale fluviale, iv) limi con sabbie di argine e ventaglio da rotta e, infine, v) depositi organici



argillosi di interalveo. Tutti questi depositi sono principalmente connessi con l'attività di corsi d'acqua appenninici ed in particolare il Reno nell'intervallo cronologico compreso tra la metà del XV secolo e la fine del XVIII secolo.

I depositi connessi con l'attività del Reno attuale accumulatisi a partire dalla fine del XVIII quando il fiume venne deviato forzatamente verso mare, sono invece costituiti da i) sabbie e limi di riempimento di canale fluviale e ii) sabbie e subordinatamente limi di riempimento di canale fluviale.

La simbologia in retinato delimita il Cavo Napoleonico, la cui principale funzione è di scolmatore del Reno. Lo scavo del canale fu iniziato nel 1807, sotto il dominio di Napoleone Bonaparte, per provvedere alla sistemazione del Reno le cui piene continuavano a causare gravi danni anche dopo la sua deviazione nel Po di Primaro.

La carta tematica in questione evidenzia come la geologia di superficie sia dominata dai depositi alluvionali di differenti ambienti sedimentari, come appunto alvei, relativi corpi arginali e depositi interalveo. Questi materiali, prevalentemente sciolti o debolmente compattati nelle prime decine di metri, sono di età olocenica e, a seconda dell'ambiente deposizionale, la loro granulometria varia da argille (prevalenti nei depositi di interalveo) a sabbie medie (prevalenti nei depositi di riempimento di canale fluviale e subordinate nei depositi di rotta).

La tracce lineari in azzurro delineano i canali naturali da rotta e tracimazione riconducibili all'attività del Reno recente, ma prima della sua definitiva deviazione.



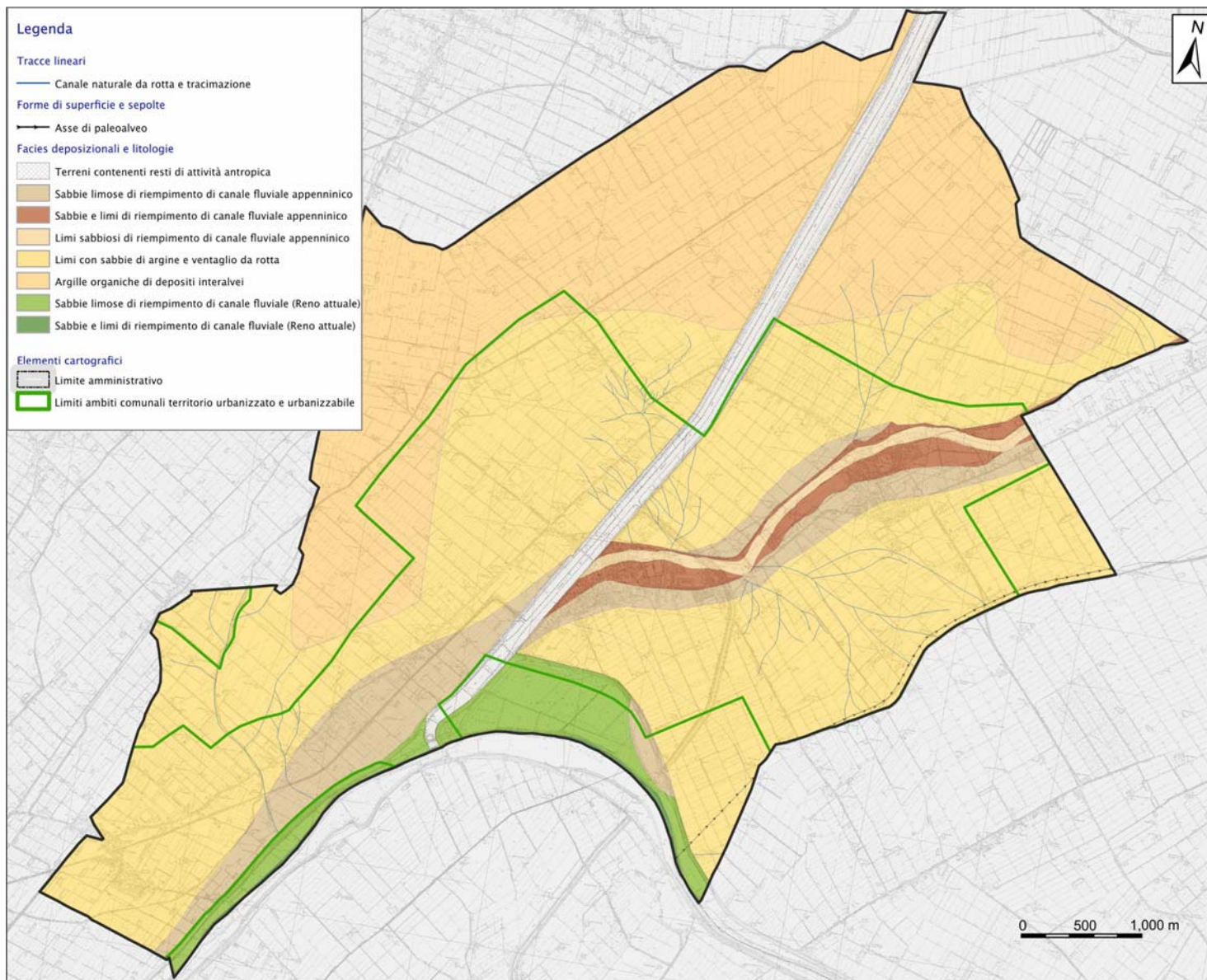


Figura 44 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 2 (Allegato D) "Carta geologica di superficie"





7.2. Carta geotecnica dei depositi superficiali

La "Carta geologico-tecnica" (Tavola 3 in Allegato D) deriva essenzialmente da una revisione delle caratteristiche della geologia di superficie e dalla geomorfologia dell'area. Le differenti unità litotecniche presenti in questa carta tematica sono state riconosciute e distinte graficamente sulla base del tipo di risentimento in occasione di una sollecitazione dinamica.

Per la descrizione della litologia è stato utilizzato l'*Unified Soil Classification System* (AST, 1985), un sistema di classificazione dei suoli, utilizzato sia in ingegneria che in geologia, che caratterizza le diverse unità mediante una sigla di due lettere. Ad esempio, la sigla *SM* indica "sabbie limose, miscela di sabbia e limo", mentre la sigla *SP* "sabbie pulite con granulometria poco assortita". Queste unità sono prevalenti nelle aree nelle quali si rinvencono i depositi di riempimento di canale fluviale relativi all'attività del paleo Reno e del Reno attuale.

L'unità litotecnica indicata con la sigla *ML* ("limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità") è preponderante nelle aree in cui si rinvencono i depositi di trascinamento fluviale, cioè nella porzione centrale del territorio di Sant'Agostino.

Infine, l'unità litotecnica *OL* indica "limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità" ed è caratteristica delle aree di intervallo che interessano il settore N-NE del comune.

In Figura 45 è riprodotta a scala ridotta la tavola in questione.



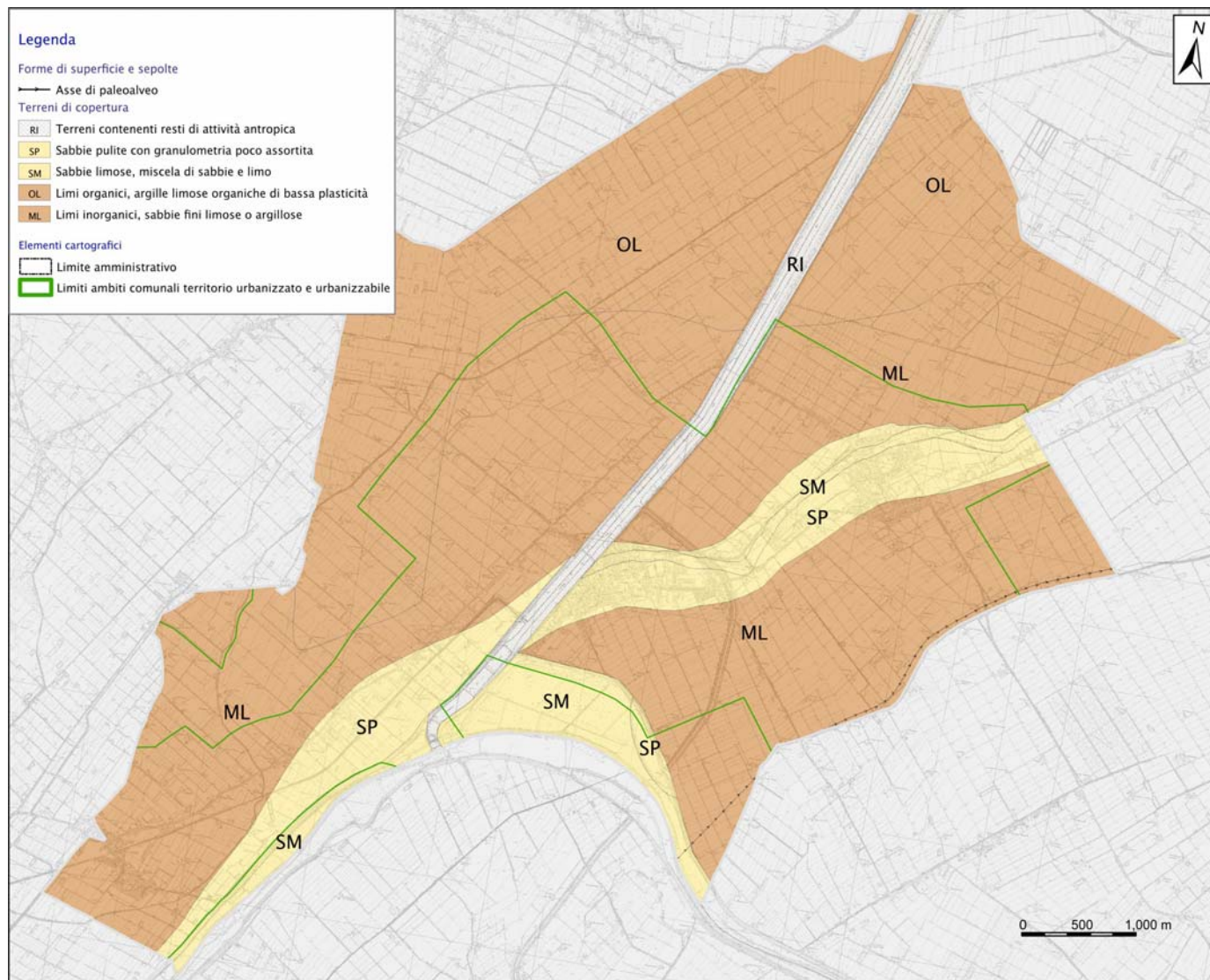


Figura 45 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 3 (Allegato D) "Carta geologico-tecnica"





7.3. Potenziale di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si manifesta a causa dello scuotimento generato da terremoti moderati e forti ($M > 5.5$), specialmente nelle zone di pianura alluvionale e costiere dove spesso sono presenti sedimenti granulari sciolti ed una falda acquifera estremamente superficiale. A causa delle sollecitazioni sismiche, nei primi 20 m la resistenza dei sedimenti granulari (limi sabbiosi, sabbie e ghiaie sabbiose) saturi in acqua e poco addensati si riduce fino ad un livello critico per cui le tensioni efficaci tendono ad annullarsi e, conseguentemente, i sedimenti liquefano. Durante questo processo naturale la pressione interstiziale dell'acqua, che è un fluido incompressibile, aumenta a tal punto da risalire attraverso fratture esistenti o di nuova formazione oppure sfruttando strutture antropiche come pozzi d'acqua, condotte e scavi per fondazioni. Durante la rapida risalita, l'acqua porta spesse con sé quantità importanti di materiale liquefatto, a volte raggiungendo la superficie terrestre dove genera estese effusioni ed i caratteristici vulcani di sabbia.

La liquefazione è una delle cause più importanti di danneggiamento e crollo delle costruzioni fondate su tale tipo di terreni ed è il risultato dell'effetto combinato di fattori 'scatenanti' (terremoto) e 'predisponenti' (condizioni del sottosuolo).

Come indicato al punto 2.8 degli ICMS, la magnitudo attesa è un parametro fondamentale nelle verifiche di liquefazione. Esso infatti determina (insieme ad altre condizioni) la necessità o meno di effettuare ulteriori indagini.

Sulla base della zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), il Comune di Sant'Agostino ricade entro la Zona 912 il cui valore di $M_{wmax} = 6.14$ è stato assunto come magnitudo attesa nel presente lavoro. Poiché tale valore supera ampiamente la soglia critica stabilita dagli ICMS ($M_w = 5.0$) è stato pertanto necessario procedere ad indagini più dettagliate per le verifiche di liquefazione. A tal fine, è stata utilizzata una procedura che rientra nei cosiddetti 'metodi semplificati'.

In tali procedure semplificate, la magnitudo attesa determina anche il valore del coefficiente MSF (fattore di scala della magnitudo) che corregge il rapporto fra CRR (rapporto di resistenza ciclica) e CSR (rapporto sforzo critico) con i quali è possibile calcolare il fattore di sicurezza (FS). Per maggiori dettagli sulla procedura si veda l'Allegato A. Tanto più



la magnitudo è elevata, infatti, tanto maggiore è l'energia rilasciata e, quindi, la capacità di generare cicli di deformazione del terreno in numero ed ampiezza tali da produrre sovrappressioni neutre e fenomeni di liquefazione.

Per determinare il valore di accelerazione su suolo rigido di riferimento la Regione Emilia-Romagna ha elaborato ed approvato (D.A.L. n. 112/2007) gli "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". La delibera fornisce tabelle e formule da utilizzare per la valutazione preliminare dell'amplificazione locale ed inoltre anche i valori di $a_{g,ref}$ (accelerazione al suolo con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni) per ogni comune dell'Emilia-Romagna. Per il Comune di Sant'Agostino il valore di $a_{g,ref}$ è pari a 0.153 g.

Per ottenere il valore di a_{g,max_s} (picco di accelerazione alla superficie dei depositi) si deve moltiplicare $a_{g,ref}$ per il valore di $F_{A_{PGA}}$ corrispondente.

Sulla base di quanto descritto nel paragrafo 3.2, il Comune di Sant'Agostino è caratterizzato da due distinti valori di $F_{A_{PGA}}$ (1.5 e 1.7) e saranno pertanto possibili due livelli di accelerazione al suolo (valori di picco) pari a 0.229 e 0.260 g, indicati rispettivamente con il colore arancio e rosa nella carta di Figura 19. I valori così calcolati sono stati utilizzati per le verifiche alla liquefazione con procedura semplificata, scegliendo opportunamente a_{g,max_s} in base alla localizzazione di ciascuna indagine.

Tramite le procedure semplificate indicate negli indirizzi regionali (DAL 112/2007) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008), per l'analisi del rischio di liquefazione è stato stimato l'Indice del Potenziale di Liquefazione I_L (comunemente anche indicato con l'acronimo inglese *LPI*), proposto da Iwasaki *et al.* (1978). Questo indice è un parametro di sintesi che, mediante un valore numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della liquefazione in un determinato sito, tenendo conto a) della severità dell'azione sismica, in termini di magnitudo ed accelerazione e b) della profondità, dello spessore e del fattore di sicurezza che caratterizzano gli strati liquefacibili.

L'indice è definito nel modo seguente:

$$I_L = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz \quad [13]$$

dove z_{crit} è la profondità massima alla quale gli strati liquefatti producono effetti in superficie (generalmente pari a 20 m), $F(z)$ è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita per

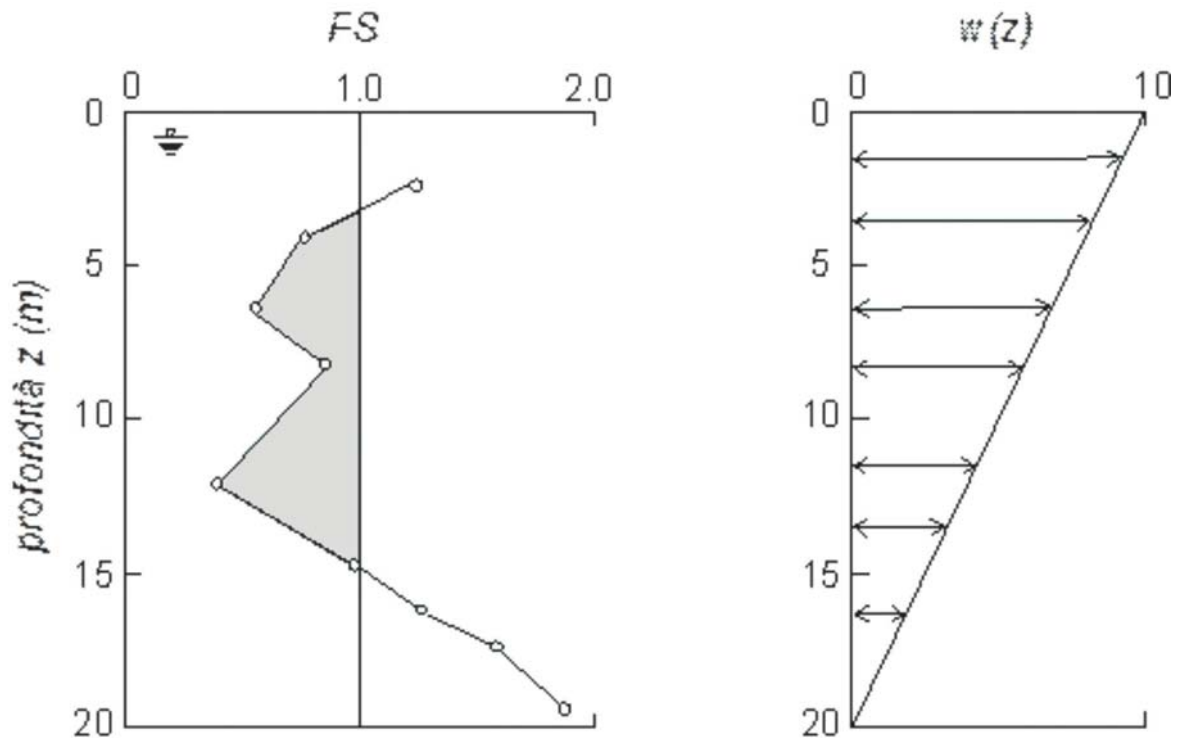


Figura 46 - Rappresentazione grafica della procedura per il calcolo dell'Indice del Potenziale di liquefazione (I_L). Il grafico di sinistra, mostra l'andamento del fattore di sicurezza (FS) in funzione della profondità e l'area in grigio evidenzia i livelli potenzialmente suscettibili di liquefazione, mentre il grafico a destra mostra l'andamento della funzione peso $w(z)$ (equazione [13]).

ogni intervallo di profondità $0 \leq z \leq z_{crit}$ in funzione del valore che, a quella profondità, assume il valore di sicurezza alla liquefazione (FS , Figura 46) così definito

$$\begin{aligned} \cdot & \quad F = 1 - FS \quad \text{se } FS \leq 1.0 \\ \cdot & \quad F = 0 \quad \quad \text{se } FS > 1.0 \end{aligned}$$

mentre $w(z)$ è un fattore di peso, funzione della profondità (Figura 46),

$$w(z) = 10 - 0.5 \cdot z \quad [14]$$

Nella letteratura scientifica sono stati descritti diversi metodi semplificati per la stima del rischio di liquefazione che utilizzano prove penetrometriche. Dai confronti effettuati da Facciorusso *et al.* (2013) tra diversi metodi è emerso che quello che fornisce valori di I_L maggiormente confrontabili con gli effetti osservati in concomitanza di eventi sismici è la procedura sviluppata da Idriss e Boulanger (2008).



Per questo studio sono state eseguite le verifiche alla liquefazione di 440 prove penetrometriche statiche (CPT, CPTE, CPTu e SCPTu), utilizzando il *software* "CLiq" (versione 1.7.5.27) della Geologismiki Geotechnical Software.

Come descritto in precedenza, i parametri di input per il calcolo sono la magnitudo ($M_w = 6.14$), l'accelerazione al sito ($a_{g_{max_s}} = 0.229$ oppure 0.260) e la profondità della falda assunta convenzionalmente pari ad 1 m, nelle zone di piana alluvionale, ed a 3 m, in corrispondenza dei dossi.

Al termine della procedura, per ogni verticale di indagine è stato calcolato il valore dell'Indice del Potenziale di Liquefazione I_L . I valori di I_L sono stati distinti in tre classi sulla base del rischio di liquefazione semplificando la classificazione proposta da Sonmez (2003):

$$\begin{aligned} 0 \leq I_L \leq 2 & \quad \text{corrispondente a rischio nullo o basso} \\ 2 < I_L \leq 5 & \quad \text{corrispondente a rischio medio} \\ 5 < I_L \leq 15 & \quad \text{corrispondente a rischio elevato} \end{aligned}$$

Nella "Carta dei fattori di amplificazione e del rischio di liquefazione" (Tavola 4 in Allegato D), le indagini sono distinte sulla base della profondità raggiunta (rombi e quadrati, rispettivamente ≤ 10 m e > 10 m). Di conseguenza, per le indagini più superficiali (≤ 10 m), il valore di I_L riportato è da considerarsi un minimo. La differente colorazione rappresenta la classe di rischio di ciascuna prova. Per completezza, il calcolo dell'indice è stato effettuato anche per le penetrometrie con punta meccanica CPT nonostante l'elevato grado di incertezza nella misura dell'attrito laterale f_s , caratteristico di questo tipo di indagini. Ciò potrebbe condurre ad un'erronea valutazione della litologia e conseguentemente di I_L . Per questa ragione le indagini CPT sono rappresentate nella carta tematica in questione con simbologia cerchietti di due dimensioni diverse.

La Tabella 7 riporta una sintesi dei valori di I_L per ciascuna indagine (codice RER) e la profondità raggiunta, mentre il Figura 47 mostra la percentuale di rappresentatività di ciascuna classe di rischio. Nella Figura 48 sono riportati i valori di I_L ottenuti.

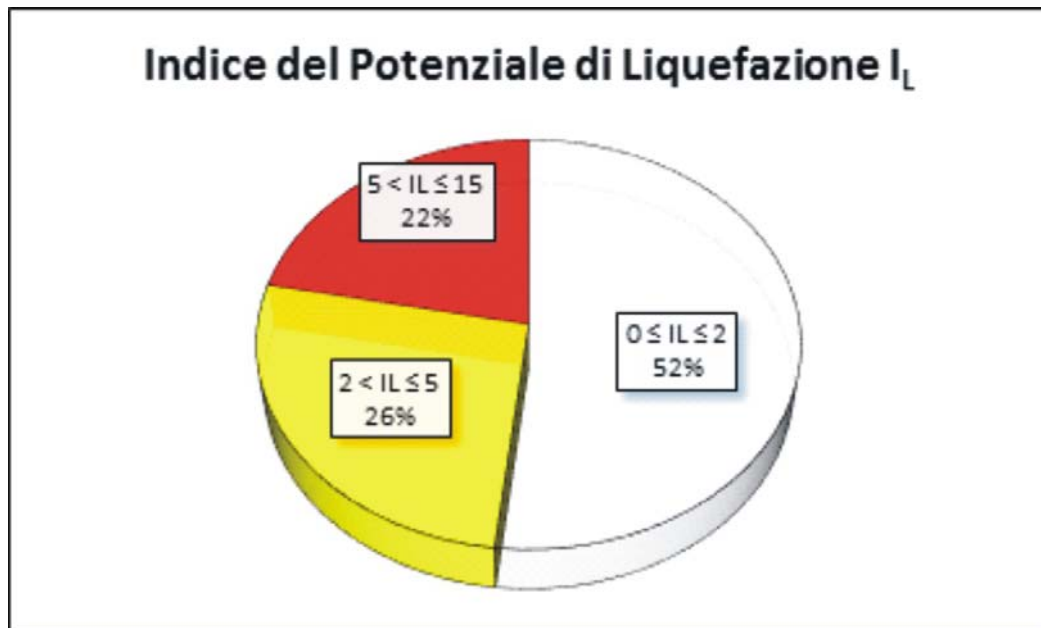


Figura 47 - Distribuzione dei valori dell'indice di liquefazione I_L secondo le classi proposte da Sonmez (2003).



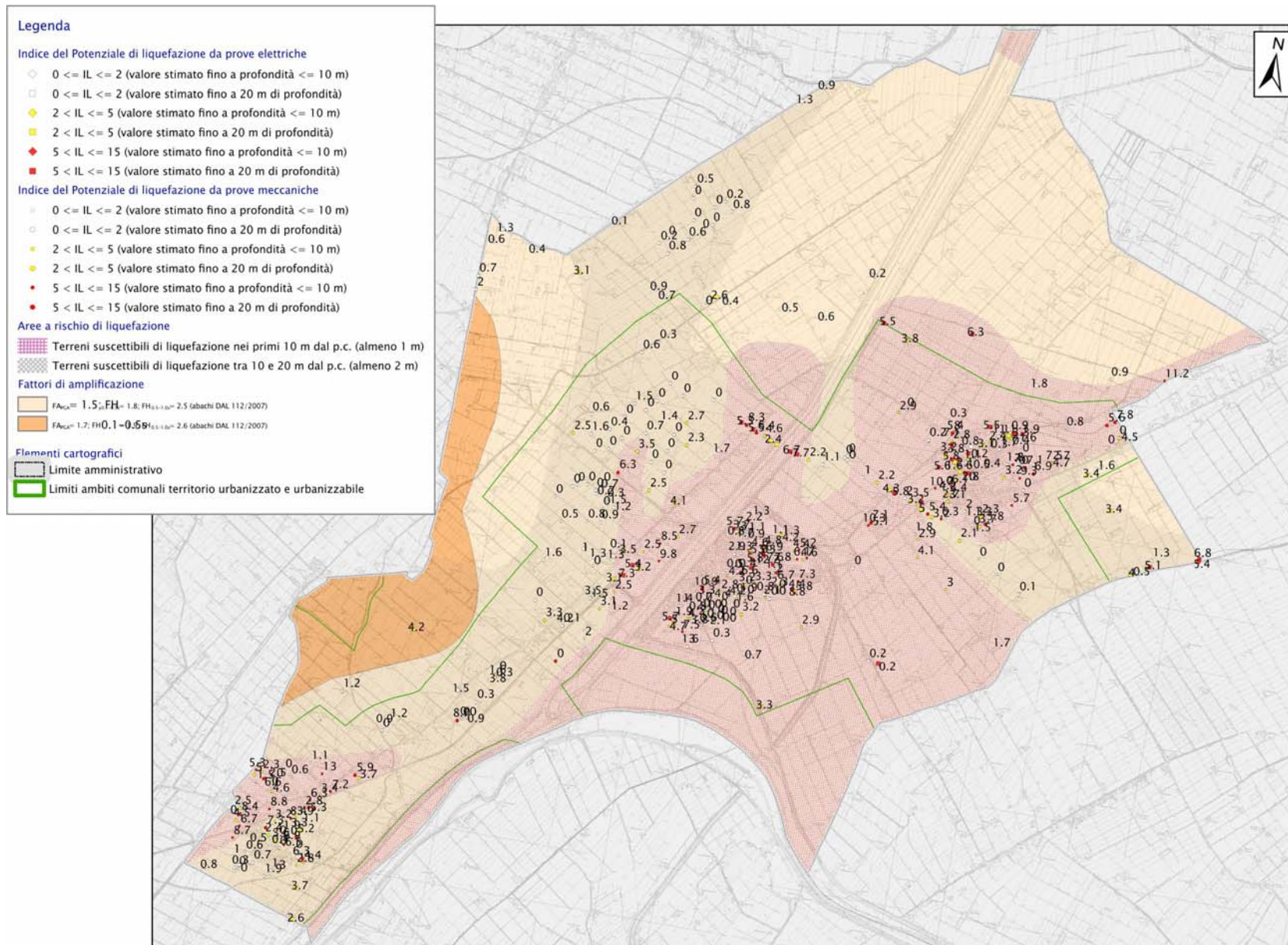


Figura 48 - Riproduzione a scala ridotta della Tavola 4 (Allegato C) "Carta dei fattori di amplificazione e dei rischi di amplificazione".





Tabella 7 - Valori di I_L per ciascuna indagine e relativa profondità raggiunta.

codice RER	profondità [m]	I_L
185130B002	35	5.5
185130B003	40	0.4
185130B004	40	0.6
185130B005	40	0.9
185130B501	31	4.6
185130B502	31	7.3
185130B503	30	10.5
185130B504	24	5.5
185130B995	30	2.5
185130B996	30	8.3
185130B998	30	5.8
185130B999	30	4.3
185130C001	8	3.2
185130C002	8	10.7
185130C003	8	6.1
185130C004	8	7.0
185130C005	8	9.3
185130C006	8	5.7
185130C007	8	1.6
185130C008	10	0.4
185130C009	10	0.3
185130C010	10	0.8

185130C011	10	0.4
185130C012	10	2.9
185130C013	10	0
185130C014	12	1.3
185130C015	12	2.3
185130C033	39	0.6
185130C034	30	0.3
185130C035	36	2.0
185130C036	30	0.7
185130C041	20	8.3
185130C043	20	4.6
185130C046	20	2.2
185130C047	20	1.1
185130C048	20	1.0
185130C049	24	2.2
185130C050	24	2.0
185130C051	24	3.5
185130C127	15	0
185130C128	12	3.2
185130C130	30	3.5
185130C131	15	1.3
185130C132	15	0
185130C133	15	4.2
185130C134	15	1.8
185130C135	20	1.9



185130C136	28	0.2
185130C137	30	3.3
185130C138A	28	2.7
185130C138B	30	3.1
185130C139	30	0.4
185130C140A	30	2.5
185130C140B	20	2.4
185130C140C	20	1.1
185130C140D	20	1.1
185130C141A	30	7.1
185130C141B	20	5.4
185130C141C	20	8.0
185130C142	22	1.1
185130C143A	25	1.6
185130C143B	20	2.1
185130C144	30	2.8
185130C145A	30	5.1
185130C145B	20	0.9
185130C145C	20	4.7
185130C155	15	0
185130C156	15	7.1
185130C157	10	3.4
185130C158	15	0
185130C159	15	0
185130C160	15	0
185130C161	15	0

185130C162	15	2.7
185130C163	15	1.5
185130C164	15	0
185130C165	15	1.4
185130C166	15	0
185130C167	15	2.3
185130C168	15	0
185130C169	15	0.7
185130C170	15	0
185130C171	15	0.6
185130C172	15	0.4
185130C173	15	0
185130C174	15	3.5
185130C175	15	0
185130C176	15	0
185130C177	15	1.6
185130C178	15	0
185130C179	15	2.5
185130C180	15	0
185130C192	30	0.3
185130C193	30	2.0
185130C402	20	0.2
185130C403	20	0.8
185130C404	20	0.6
185130C405	20	0
185130C406	20	0.8



185130C407	20	0.2
185130C408	20	0.5
185130C409	20	0
185130C412	20	0
185130C413	20	0
185130C416	20	0
185130C418	14	0
185130C428	30	6.4
185130C987	29	0.2
185130C988	15	0.5
185130C989	15	0
185130C990	15	2.8
185130C991	30	6.0
185130C992	17	0
185130C993	20	0
185130C994	16	0
185130C995	22	0.8
185130C996	24	0.9
185130C997	23	3.8
185130C998	15	3.2
185130C999	15	5.8
185130E040	20	5.3
185130E042	35	5.5
185130E044	41	4.1
185130E045	46	6.7
185130E427	48	4.3

185130E430	36	2.4
185130E431	44	7.7
185130E432	24	5.8
185130E433	46	8.6
185130E434	30	5.0
185130U004	30	0.6
185130U005	30	0.5
185130U006	40	2.6
185130U007	37	0
185130U008	30	0.7
185130U009	30	0.9
185130U010	30	3.1
185130U011	30	0.4
185130U019	37	1.9
185130U020	20	1.3
185130U021	20	0.1
185130U022	30	1.8
185130U023	30	6.3
185130U024	30	3.8
185130U503	35	1.3
185130U504	35	0.2
185130U505	20	5.6
185130U506	20	7.4
185130U507	20	7.3
185130U508	20	3.0
185130U509	20	1.1



185130U510	20	3.1
185130U511	20	4.6
185130U512	20	5.0
185130U513	20	7.5
185130U514	20	9.5
185130U999	20	1.7
185140B001	32	3.4
185140C001	10	11.2
185140C174	20	7.8
185140C175	14	5.6
185140C222	11	0
185140C249A	30	4.7
185140C249B	20	7.5
185140C249C	19	2.7
185140C250	15	6.9
185140C255	10	0.9
185140U002	30	3.4
185140U003	40	1.9
185140U004	40	1.6
185140U005	31	0.8
202040B999	29	0.8
203010B001	35	1.3
203010B999	30	3.5
203010C001	11	0
203010C002	8	2.0
203010C003	7	3.1

203010C004	8	1.2
203010C005	8	2.5
203010C006	8	2.5
203010C007	8	9.8
203010C008	8	2.7
203010C009	8	8.5
203010C010	8	4.7
203010C011	7	7.5
203010C012	7	0.8
203010C013	9	1.0
203010C014A	7	0
203010C014B	10	0.7
203010C015	8	4.4
203010C016	8	1.9
203010C017	8	2.1
203010C018	9	7.3
203010C019	9	5.8
203010C020	7	5.2
203010C021	7	7.0
203010C022	8	3.7
203010C023	8	2.2
203010C024	8	3.0
203010C025	8	4.1
203010C026	8	8.8
203010C027	8	8.4
203010C028	8	6.9



203010C029	8	6.5
203010C030	8	0.6
203010C031	8	8.7
203010C032	8	6.7
203010C033	8	0
203010C034	8	1.1
203010C035	8	13.0
203010C036	10	0.3
203010C037	10	0
203010C038	10	0.8
203010C039	10	0.5
203010C040	10	0
203010C041	10	6.3
203010C042	10	1.3
203010C043	10	1.2
203010C044	10	1.9
203010C045	10	4.4
203010C046	10	0.6
203010C047	10	0
203010C048	10	0
203010C049	10	0
203010C050	10	1.6
203010C051	10	0
203010C052	10	0
203010C053	10	3.3
203010C054	10	1.1

203010C055	10	1.3
203010C056	10	3.0
203010C057	10	2.8
203010C058	10	4.4
203010C059	10	1.9
203010C060	10	3.9
203010C061	10	2.8
203010C062	10	6.3
203010C063	10	3.4
203010C064	10	7.2
203010C065	10	5.3
203010C066	10	1.5
203010C067	10	2.5
203010C068	10	4.6
203010C069	10	4.6
203010C070	10	6.1
203010C071	10	4.4
203010C072	10	0
203010C073	10	0
203010C074	10	0
203010C075	11	0
203010C076	10	0.5
203010C077	10	0
203010C078	10	4.2
203010C079A	10	10.6
203010C079B	10	11.7



203010C079C	12	7.6
203010C079D	12	7.8
203010C080	10	3.3
203010C081	10	2.8
203010C082	10	1.3
203010C083	10	10.3
203010C084	10	7.1
203010C085	12	5.8
203010C086	12	3.7
203010C087	12	10.9
203010C094	12	3.6
203010C101	25	5.4
203010C102	30	3.2
203010C103	18	2.1
203010C104	10	0
203010C105	10	0
203010C106	15	0
203010C107	15	4.2
203010C108	10	0.9
203010C109	10	0
203010C110	10	0.6
203010C111	10	0
203010C112	12	0
203010C113	25	3.8
203010C114	12	1.5
203010C115	12	0.8

203010C116	12	0.9
203010C117	15	0
203010C118	15	0
203010C119	15	0
203010C120	15	1.1
203010C121	15	0.2
203010C122	15	1.7
203010C123	16	0.9
203010C124	14	1.1
203010C125	13	0.7
203010C126	15	0.6
203010C127	10	2.9
203010C128	11	5.0
203010C129	10	2.3
203010C130	10	0
203010C131	11	0
203010C132	15	0.4
203010C133	15	2.4
203010C134	16	1.2
203010C135	20	1.5
203010C136	16	0
203010C137	18	0.9
203010C138	28	0.9
203010C139	15	0
203010C140	25	5.1
203010C141	15	0



203010C142	18	0.2
203010C143	18	3.2
203010C144	20	0
203010C145	15	0
203010C146	20	0.1
203010C147	15	0
203010C148	14	2.5
203010C149	18	1.2
203010C150	15	0
203010C151	20	0.7
203010C152	10	1.7
203010C153	11	0
203010C154	15	3.7
203010C155	30	1.6
203010C156	23	8.7
203010C157A	20	2.9
203010C157B	20	1.3
203010C158A	30	1.6
203010C158B	17	0.3
203010C159	16	0.3
203010C160A	20	0
203010C160B	32	0
203010C161A	20	3.5
203010C161B	21	1.5
203010C162	23	3.3
203010C163A	30	3.0

203010C163B	20	1.6
203010C164A	23	4.2
203010C164B	20	0.1
203010C165	13	8.4
203010C166	13	4.5
203010C167	13	5.9
203010C168	15	5.4
203010C169	13	5.3
203010C170	15	3.3
203010C171	12	5.2
203010C172	15	7.3
203010C173	15	6.3
203010C174	15	1.0
203010C175	15	1.9
203010C176	15	0.7
203010C177	15	0
203010C178	15	1.0
203010C179	15	0
203010C180	15	0
203010C181	15	3.2
203010C182	15	0.3
203010C183	15	0
203010C184	15	2.3
203010C185	15	8.8
203010C186	12	5.7
203010C187	8	3.0



203010C188	15	4.4
203010C189	15	6.3
203010C190	15	2.5
203010C191	10	3.5
203010C192	11	6.6
203010C193	11	0.4
203010C194	13	6.7
203010C195	10	1.1
203010C196	10	2.0
203010C197	10	13.5
203010C198	11	12.2
203010C199	11	11.1
203010C200	10	3.8
203010C201	10	3.2
203010C202	10	5.3
203010C203	10	6.9
203010C204	11	4.8
203010C205	10	2.9
203010C206	10	1.8
203010C207	10	1.5
203010C208	10	0
203010C209	10	0
203010C210	10	0
203010C211	11	0
203010C212	11	4.5
203010C213	10	0.7

203010C214	11	5.4
203010C215	10	3.8
203010C216	10	1.2
203010C217	11	1.4
203010C222	22	5.6
203010C223	21	4.6
203010C224	30	4.2
203010C225	30	0.8
203010C226	30	0.5
203010C227	30	6.6
203010C228	12	0
203010C229	12	0
203010C230	15	1.7
203010C231	21	0.2
203010C232	21	0
203010C233	15	0
203010C234	23	0
203010C235	10	0
203010C236	10	1.1
203010C237	8	0
203010C238	8	1.8
203010C239	8	0.6
203010C240	15	2.1
203010C241	15	2.1
203010C242	10	0
203010C243	15	0.3



203010C244	8	0
203010U001	30	6.2
203010U002	15	5.8
203010U005	15	5.7
203010U006	26	5.0
203010U007	28	1.3
203010U008	36	0.1
203010U009	26	5.4
203010U010	17	3.1
203010U011	24	1.7
203010U012	40	1.0
203010U013	20	7.3
203010U014	20	3.2
203010U501	35	1.5
203010U502	30	8.8
203010U504	33	2.6
203010U505	29	4.1
203010U508	35	3.3
203010U509	35	4.2
203010U991	20	1.3
203010U992	20	0.7
203010U993	20	3.7
203020C063	18	0.1
203020C064	20	1.3
203020U095	39	6.8
203020U096	39	5.4

203020U097	39	5.1
203020U098	39.5	0.5
203020U099	36	4.0



8. Carta delle MOPS

Così come previsto dagli ICMS (2008) e dalla delibera 112/2007 della Regione Emilia-Romagna sono state individuate e delimitate le zone suscettibili di effetti locali ed è stata prodotta la "Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica" (MOPS; Tavola.5 in Allegato D). In particolare, in essa sono presenti diversi livelli di informazione sovrapposti come, 1) le liquefazioni puntuali e lungo allineamenti di fratture, osservate in occasione degli eventi del maggio 2012, 2) il fattore di amplificazione (già discusso nel paragrafo 3,2), 3) la classificazione semi-quantitativa delle indagini penetrometriche in base alla presenza o assenza di orizzonti liquefacibili a diverse profondità e 4) le aree a rischio di liquefazione (e non). I diversi livelli grafici contenuti nella suddetta Tavola 5 sono di seguito brevemente descritti



8.1. Livello grafico: effetti secondari

Come brevemente descritto nel paragrafo 3.1, in occasione dello sciame sismico del maggio 2012, il Comune di Sant'Agostino è stato interessato da importanti fenomeni di liquefazione. Le evidenze superficiali di tali fenomeni all'interno del territorio comunale sono rappresentate nella carta delle MOPS. In particolare, sono state riconosciute e suddivise due maggiori categorie di fenomeni superficiali secondari: le effusioni di materiale sabbioso generalmente puntuali ed i sistemi di fratture allineate. Tali dati sono stati raccolti da una serie di rilievi di campagna effettuati nell'immediato post-sismico da diversi gruppi di lavoro, tra cui il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, il Gruppo di lavoro Liquefazione della Regione Emilia-Romagna, EMERGEIO, il Servizio Tecnico Bacino Reno, il Servizio Tecnico del Po di Volano e della Costa e GEOPROCIV.



8.2. Livello grafico: fattore d'amplificazione

Un ulteriore effetto cosismico secondario che ha interessato il territorio comunale, e in generale tutta l'area epicentrale, è rappresentato da fenomeni di amplificazione del moto del suolo. La Regione Emilia-Romagna ha predisposto degli abachi per stimare il fattore di amplificazione in diversi contesti geologici (Allegato A2 nel DAL 112/2007) e diverse analisi sulla risposta sismica locale effettuate nell'area del terremoto da alcuni gruppi di ricerca (e.g. Facciorusso *et al.*, 2012; Laurenzano *et al.*, 2013) hanno fornito valori in generale accordo con quelli proposti dai suddetti abachi regionali. In realtà, in occasione degli eventi del maggio 2012 sono stati localmente registrati anche valori di accelerazione orizzontali superiori a 0.3 g, di gran lunga maggiori rispetto a quelli attesi. La Regione Emilia-Romagna si è quindi impegnata per verificare e rivalutare i fattori di amplificazione da attribuire in contesti geologici particolari come quelli dell'area epicentrale (e.g. 17 comuni dell'Ordinanza 70/2012).

A tal fine, sono state confrontate una serie di indagini geofisiche con alcuni profili stratigrafici del sottosuolo padano. Ciò ha permesso di evidenziare un contrasto di impedenza, e quindi di una variazione delle proprietà geofisiche del sottosuolo, ben riconoscibile in buona parte dell'area epicentrale a profondità comprese tra circa 70 e 150 m. Tale variazione litologico-geofisica è stata associata all'interfaccia tra il tetto del Sintema Emiliano-Romagnolo (AES, 400-450 ka; RER & ENI-AGIP, 1998) e la base del subsistema AES6 (230-250 ka; RER & ENI-AGIP, 1998; ved. Figura 4). Anche se la velocità delle onde di taglio nell'unità inferiore non raggiunge mai gli 800 m/s, necessari per poter definire quest'ultimo il 'substrato geofisico' come previsto dalla normativa, ai fini della microzonazione sismica dei 17 Comuni ed in particolare per definire il fattore di amplificazione, è stata presa in considerazione la profondità del tetto di AES indicandolo convenzionalmente come 'pseudo-substrato'.

Pertanto, sulla base delle isobate del suddetto limite stratigrafico, il Servizio Geologico regionale ha tentativamente distinto le aree dove il tetto dello pseudo-substrato si trova a profondità maggiori di 120 m (100 + 20 m per includere l'incertezza) da quelle dove il substrato è a profondità minori. Tali aree sono state indicate come A1 e A2, rispettivamente.



Utilizzando quindi gli abachi regionali, i fattori di amplificazione per le due aree sono i seguenti:

$$\text{aree A1: } FA_{PGA} = 1.5; \quad FA_{0.1-0.5 \text{ s}} = 1.8; \quad FA_{0.5-1 \text{ s}} = 2.5 \quad [5]$$

$$\text{aree A2: } FA_{PGA} = 1.7; \quad FA_{0.1-0.5 \text{ s}} = 1.9; \quad FA_{0.5-1 \text{ s}} = 2.6 \quad [6]$$

Per quanto riguarda il Comune di Sant'Agostino, la maggior parte del territorio comunale rientra nell'area A1 ed è quindi caratterizzata da un fattore d'amplificazione $FA_{PGA} = 1.5$. Soltanto un ristretto settore sudoccidentale del Comune rientra nell'area A2 ed è perciò caratterizzato da un fattore di amplificazione leggermente più elevato ($FA_{PGA} = 1.7$). Tale variazione laterale è dovuta alla presenza nel sottosuolo della terminazione periclinale dell'anticlinale sepolta di Mirandola (ITIS107; Figura 8) la cui cresta è orientata circa ESE-WNW. Come è stato descritto nel capitolo 2, simili piegamenti nel sottosuolo sono dovuti a ripetute riattivazioni di una faglia cieca la cui attività tardo-quadernaria è chiaramente documentata dall'evidente deformazione dei depositi appartenenti all'unità stratigrafica AES6 (230-250 ka; Figura 4).

Le stesse osservazioni sono valide per il valore dell'Intensità di Housner, definita come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità in un intervallo prefissato di frequenze. Si tratta di un parametro particolarmente importante perché è direttamente correlabile all'energia che viene dissipata nelle strutture durante un terremoto, e fornisce quindi delle indicazioni riguardo il possibile livello di danneggiamento subito dagli edifici.

Il valore dell'Intensità di Housner è stato stimato per gli intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.0 s, che corrispondono alle frequenze proprie di vibrazione delle maggior parte delle tipologie edilizie più comuni nei territori soggetti all'Ordinanza 70/2012. Il periodo (T) di vibrazione è direttamente proporzionale al numero di piani di un fabbricato, per cui:

- edifici con periodo proprio di vibrazione compreso tra 0.1-0.5 s, hanno un numero di piani variabile tra 3 e 5 in base alla tipologia costruttiva;
- edifici con periodo proprio di vibrazione compreso tra 0.5-1.0 s hanno un numero di piani variabile tra 5 e 10 in base alla tipologia costruttiva.



8.3. Livello grafico: potenziale di liquefazione

Considerando che la liquefazione è un fenomeno che interessa i sedimenti granulari poco addensati e saturi presenti entro 20 m dal piano campagna, tutte le indagini penetrometriche disponibili sono state valutate dal punto di vista semi-quantitativo per individuare la presenza o meno di orizzonti liquefacibili. In accordo con il Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna, si è proceduto a classificare tutte le prove geognostiche sulla base dei seguenti criteri:

- L1: presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 30-40 cm di spessore), sotto falda, nei primi 5 m dal piano campagna;
- L2: presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 1 m di spessore) tra 5 e 10 m dal piano campagna;
- L3: presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 2 m di spessore) tra 10 e 15 m dal piano campagna;
- L4: presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 2 m di spessore) tra 15 e 20 m dal piano campagna;
- N: assenza di orizzonti liquefacibili importanti nei primi 20 m dal piano campagna;
- X: dato non interpretabile.

Le prove classificate come "X" sono quelle i cui dati non sono stati ritenuti verosimili e/o sufficientemente chiari e dettagliati.

La suddetta classificazione fornisce soltanto informazioni puntuali, in corrispondenza cioè delle prove geognostiche analizzate. Oltretutto, le prove disponibili per il Comune di Sant'Agostino non sono certamente distribuite in modo omogeneo su tutto il territorio, ma caratterizzate da addensamenti locali e ampie aree completamente sprovviste di prove geognostiche. Con il successivo processo di interpolazione geografica delle prove classificate come sopra, si è provveduto a campire subaree con caratteristiche omogenee. Al fine di i) semplificare la rappresentazione grafica di questa informazione, ii) tener conto della parziale soggettività durante la fase di interpretazione dei dati e iii) considerare il grado di incertezza ad essi associato relativamente al potenziale di liquefazione, sempre in accordo con il Servizio

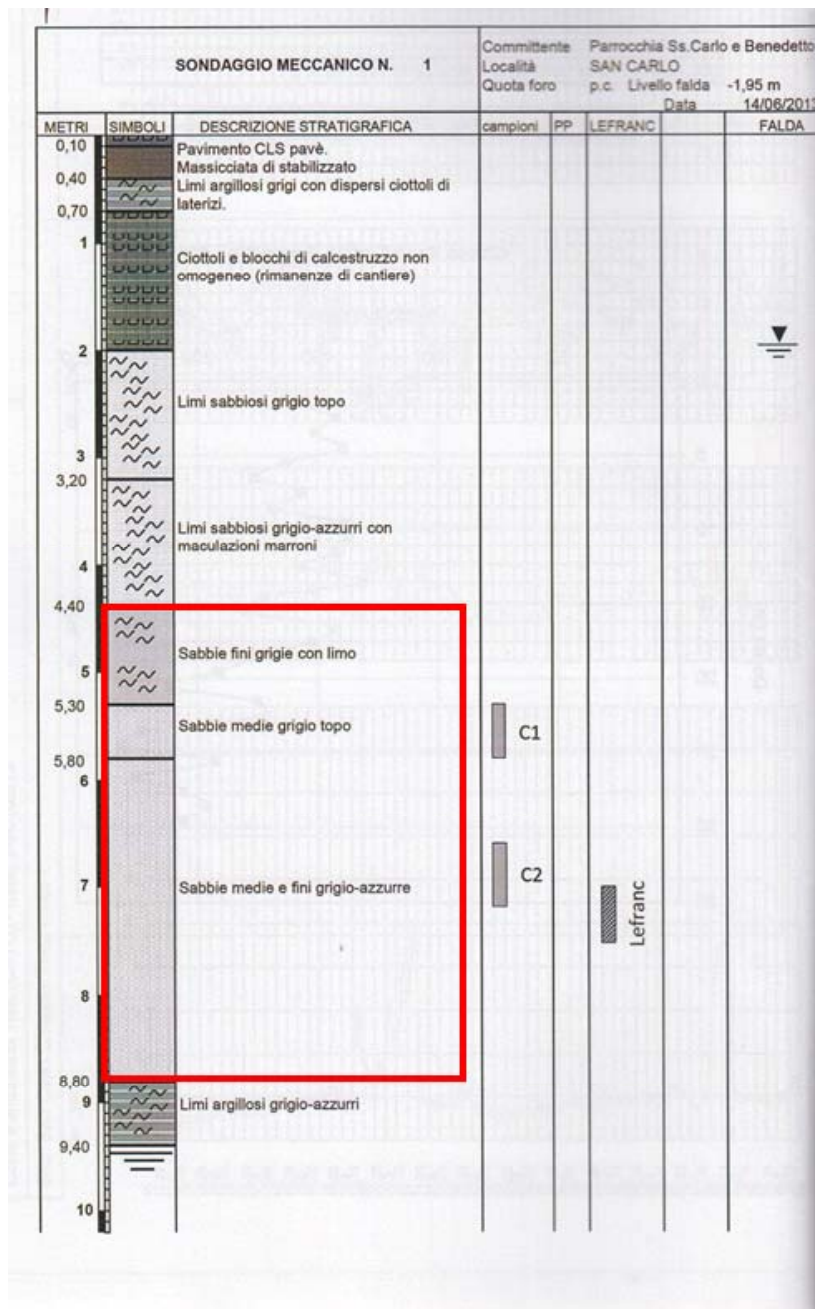


Figura 49 - Esempio di rapporto di prova da un sondaggio con carotaggio continuo effettuato in corrispondenza del paleoalveo del Reno. Il rettangolo rosso evidenzia la presenza di un importante livello di sabbie da fini a medie compreso tra 4.4 e 8.8 m dal piano campagna.

Geologico della Regione Emilia-Romagna, si è deciso di raggruppare le diverse prove e distinguere fondamentalmente tre tipologie di terreno in termini di rischio per la liquefazione.

a) aree caratterizzate dalla presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 1 m di spessore) nei primi 10 m dal piano campagna (LQ1);



b) aree caratterizzate dalla presenza di orizzonti liquefacibili (almeno 2 m di spessore) tra 10 e 20 m dal piano campagna (LQ2);

c) area prive di orizzonti liquefacibili nei primi 20 m dal piano campagna (N).

Tali aree sono rappresentate nella Tavola 5 in Allegato D con campiture a quadretti rossi verticali (LQ1), a quadretti grigi obliqui (LQ2) e prive di colore (N).

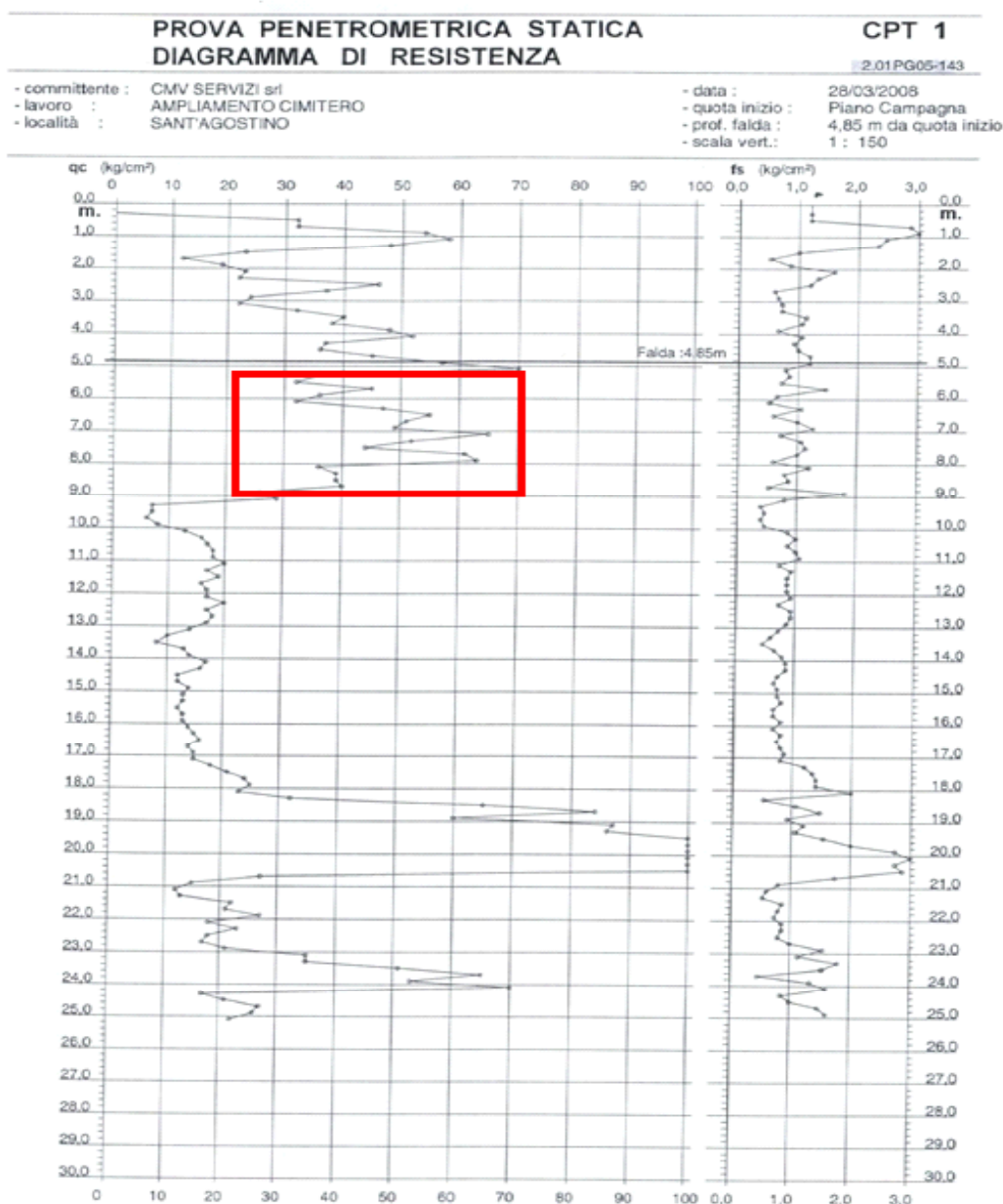


Figura 50 - Esempio di rapporto di prova di penetrometria statica (CPT) effettuata in corrispondenza del paleovalve del Reno. Il quadrato rosso evidenzia la presenza di un importante livello di sabbie da fini a medie compreso tra ca. 5 e 9 m dal piano campagna.



Per quanto riguarda il territorio del Comune di Sant'Agostino, le indagini indicano la presenza di orizzonti liquefacibili importanti nei primi 10 m lungo tutto il corso del Reno attuale e del ramo abbandonato che passa per San Carlo continuando per Mirabello. Dal Medioevo e fino alla fine del XVIII secolo, il fiume ha infatti depositato corpi pluri-metrici (fino a 5 m) di sabbie e subordinatamente sabbie limose soprattutto in corrispondenza dell'alveo. Attualmente, i livelli liquefacibili si trovano ad una profondità variabile tra 4 m e 10-11 m dal piano campagna, in funzione della quota topografica, come mostrano i rapporti di prova riportati nelle Figure 49 e 50. Questo tipo di prove hanno permesso di classificare le aree dove ricadevano come LQ1.

Lungo i paleoargini, invece, lo spessore degli orizzonti liquefacibili, costituiti da limi sabbiosi e sabbie limose, si riduce fino a 2-2.5 m. Questi orizzonti sono generalmente presenti tra 1.5-2.5 m e localmente fino a 4-4.5 m, in funzione della quota topografica, come mostrano i rapporti di prova rappresentati nelle Figure 51 e 52.. Anche queste aree sono state classificate come LQ1.

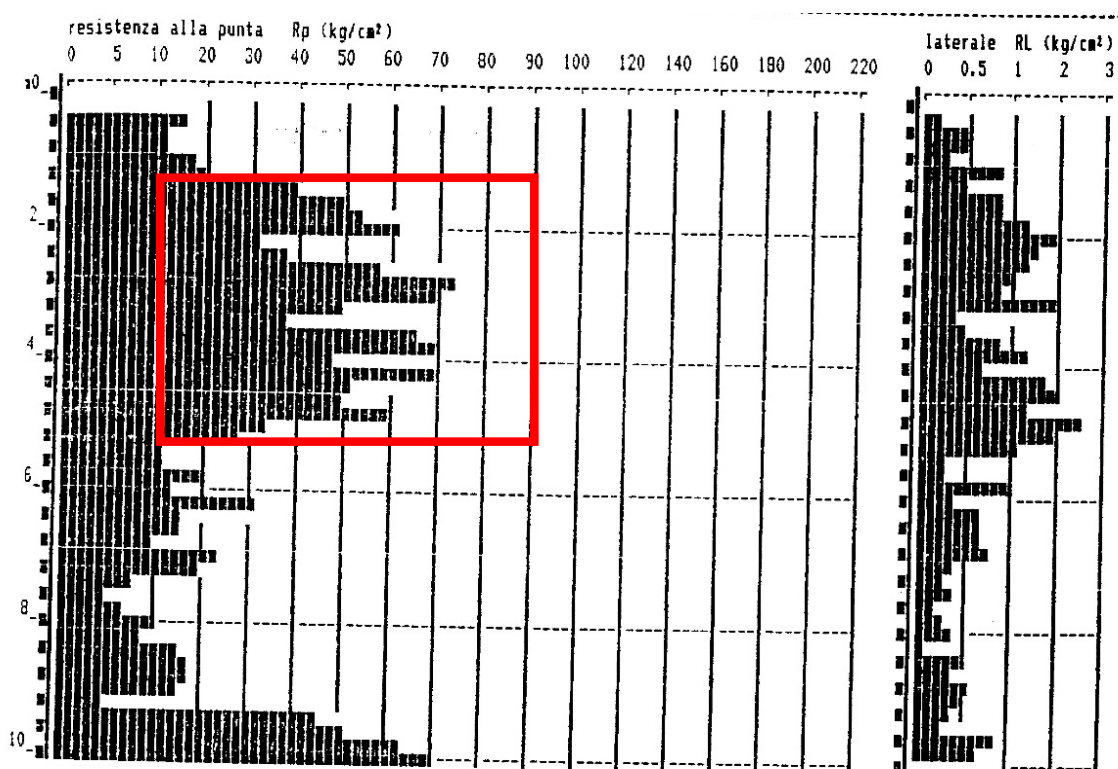


Figura 51 – Esempio di rapporto di prova CPT effettuata in corrispondenza del paleo argine del Reno. Il rettangolo rosso evidenzia la presenza di un livello costituito dall'alternanza di sabbie-sabbie limose compreso tra 1 m e 5 m dal piano campagna.

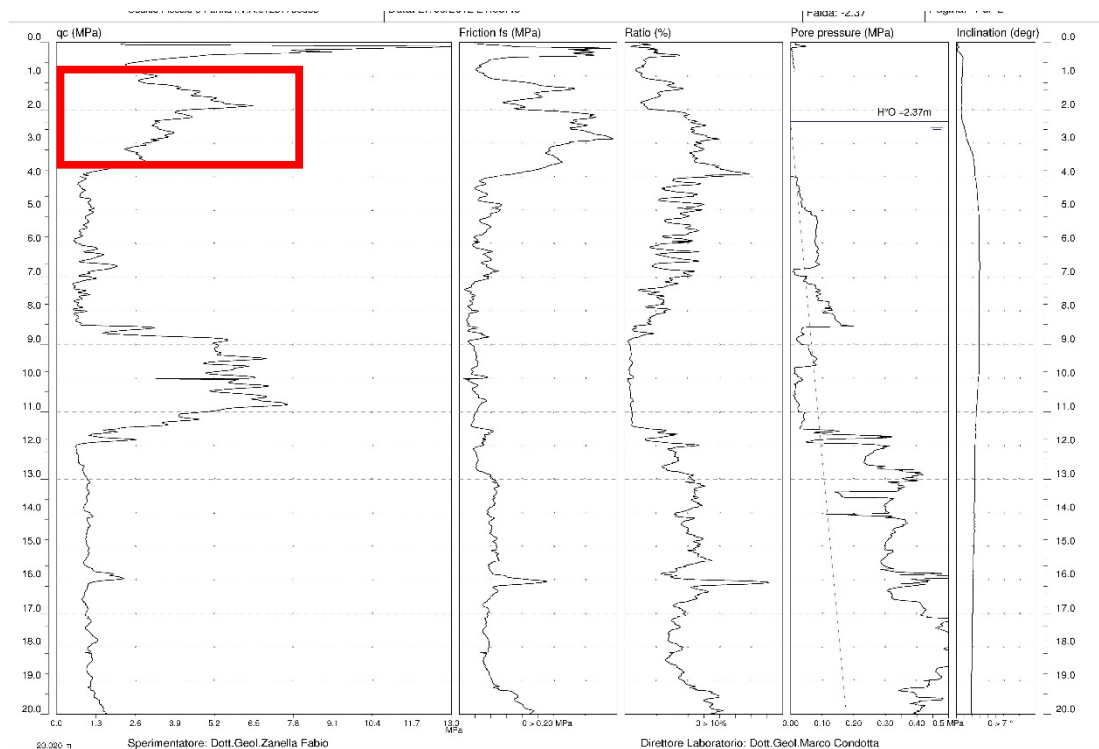


Figura 52 – Esempio di rapporto di prova CPTu effettuata in corrispondenza del paleo argine del Reno. Il rettangolo rosso evidenzia la presenza di un livello costituito da sabbie e subordinatamente da sabbie limose compreso tra 1 m e 3.5 m dal piano campagna.

Al di fuori del corso d'acqua attuale ed abbandonato del fiume Reno, sono state individuate ampie aree, dalla geometria lobata, caratterizzate dalla presenza di livelli liquefacibili pluri-decimetrici (localmente fino a metrici) tipicamente nei primi 5 m dal piano campagna (Figure 53 e 54). Anche nel modello digitale del terreno (Figura 43), infatti, sono evidenti delle zone leggermente rialzate che formano dei dolci pendii di raccordo tra gli argini, tipicamente sopraelevati di 4-5 m, e la pianura alluvionale. Ciò è dovuto alla presenza di alcuni maggiori eventi di rotta e tracimazione fluviale del paleo Reno. Tali aree sono presenti a nord e a sud degli abitati di San Carlo e di Sant'Agostino e sono state classificate come aree LQ1. Poiché lo spessore dei corpi sabbiosi diminuisce progressivamente allontanandosi dal corso del fiume, è evidente come il limite geografico di questi lobi sia localmente caratterizzato da un grado di incertezza maggiore, soprattutto nelle zone prive di indagini geognostiche.

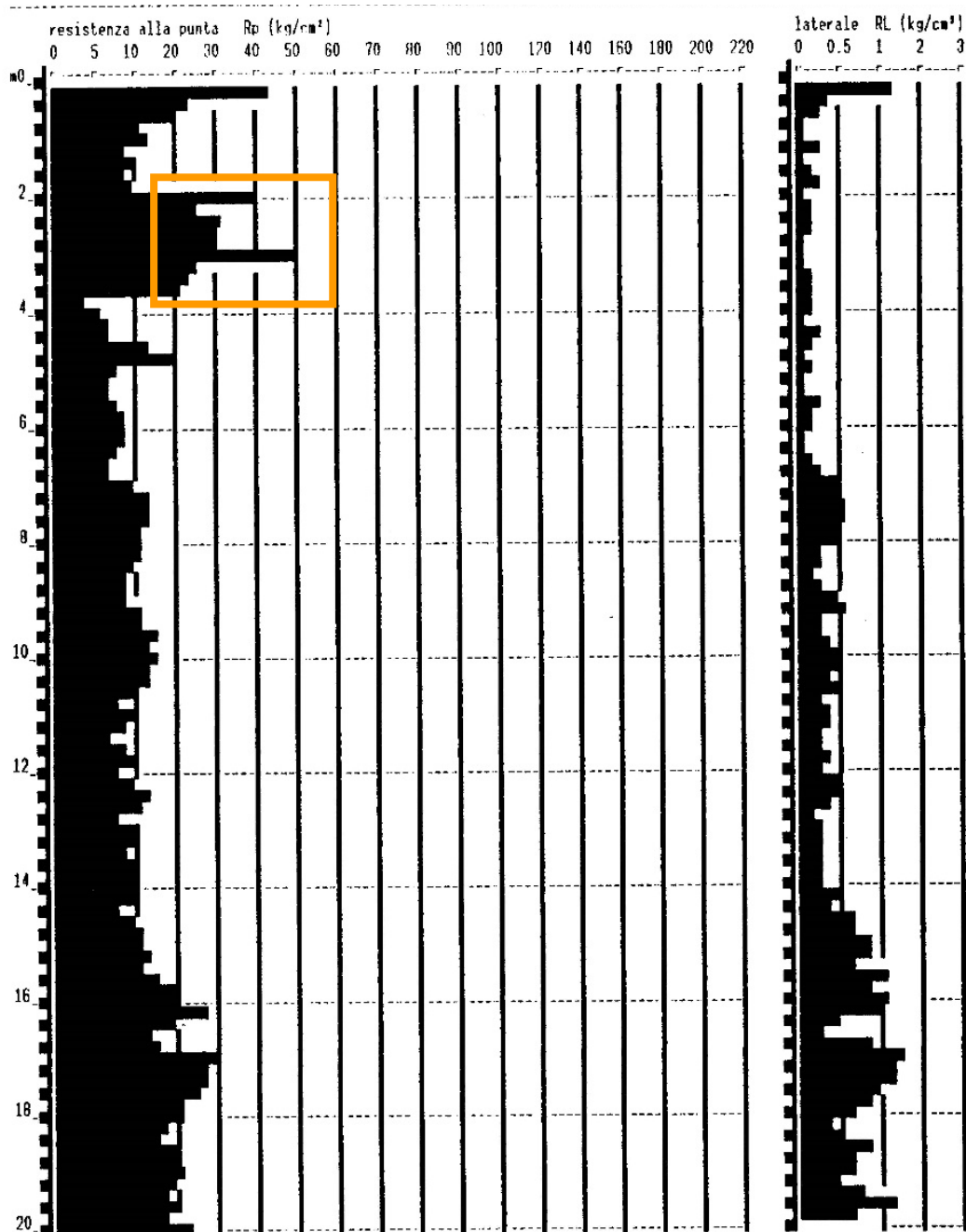


Figura 53 – Esempio di rapporto di prova CPTe effettuata a NW di San Carlo, in uno dei due lobi caratterizzati da depositi di rotta fluviale. Il rettangolo arancione evidenzia la presenza di un tale livello costituito da -sabbie limose e limi sabbiosi tra 2 m e ca. 4 m dal piano campagna.

È stata inoltre individuata un'ennesima area LQ1 nel settore meridionale del Comune di Sant'Agostino, in località Dosso. In questa zona, infatti, è stata riscontrata la presenza di un livello liquefacibile di spessore metrico a profondità variabili tra 2 e 3.5 m dal piano

campagna (Figure 55 e 56). Questi depositi sono stati probabilmente accumulati da un antico canale che è stato poi sepolto dai depositi di rotta o tracimazione fluviale del paleo Reno.

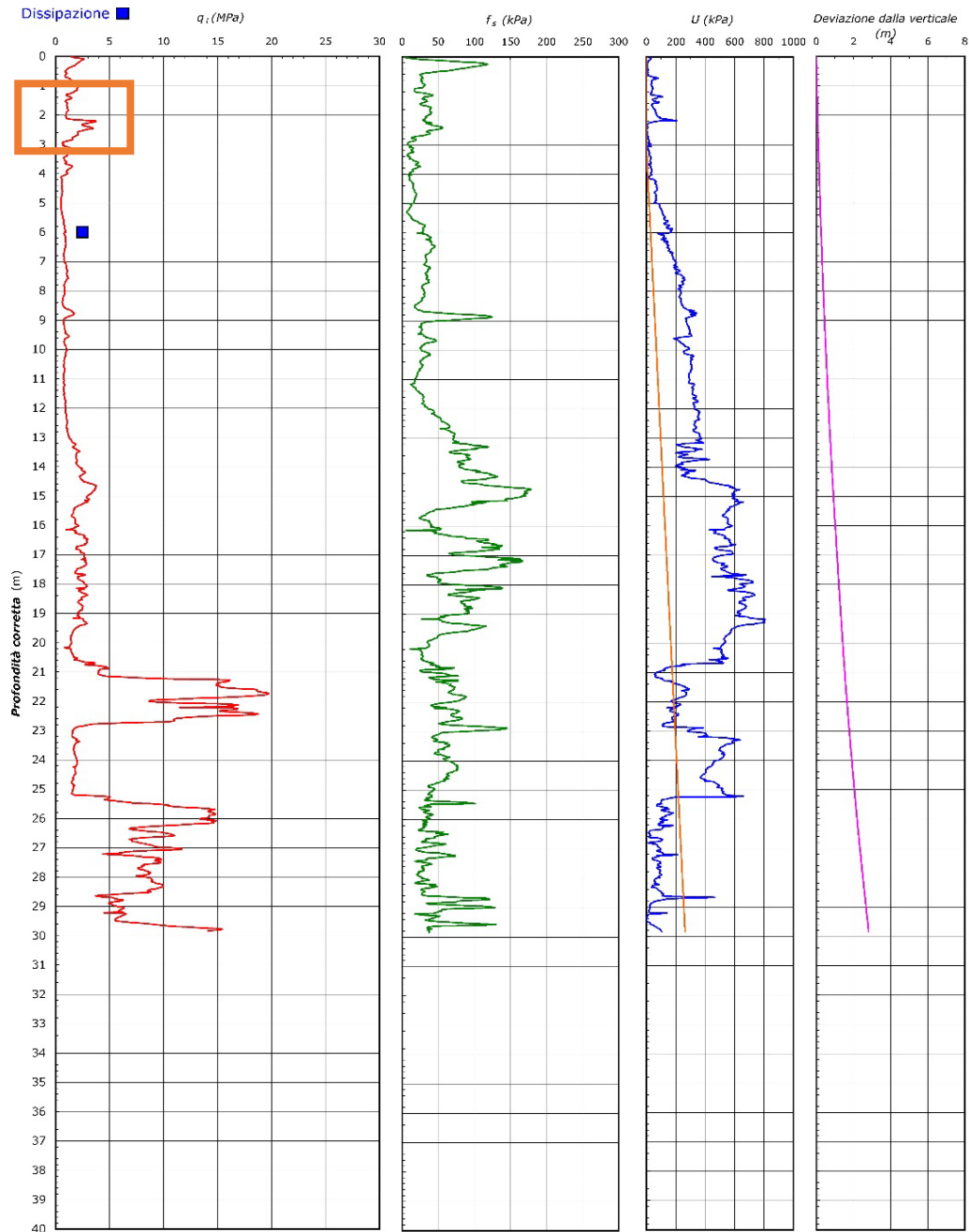


Figura 54 – Esempio di rapporto di prova CPTu effettuata a ca. 1 km di distanza dal paleo Reno. Il rettangolo arancione evidenzia la presenza di un corpo di rotta relativamente distale, costituito da sabbie limose e limi sabbiosi, di spessore inferiore ad 1 m, a ca. 2 m di profondità dal piano campagna.

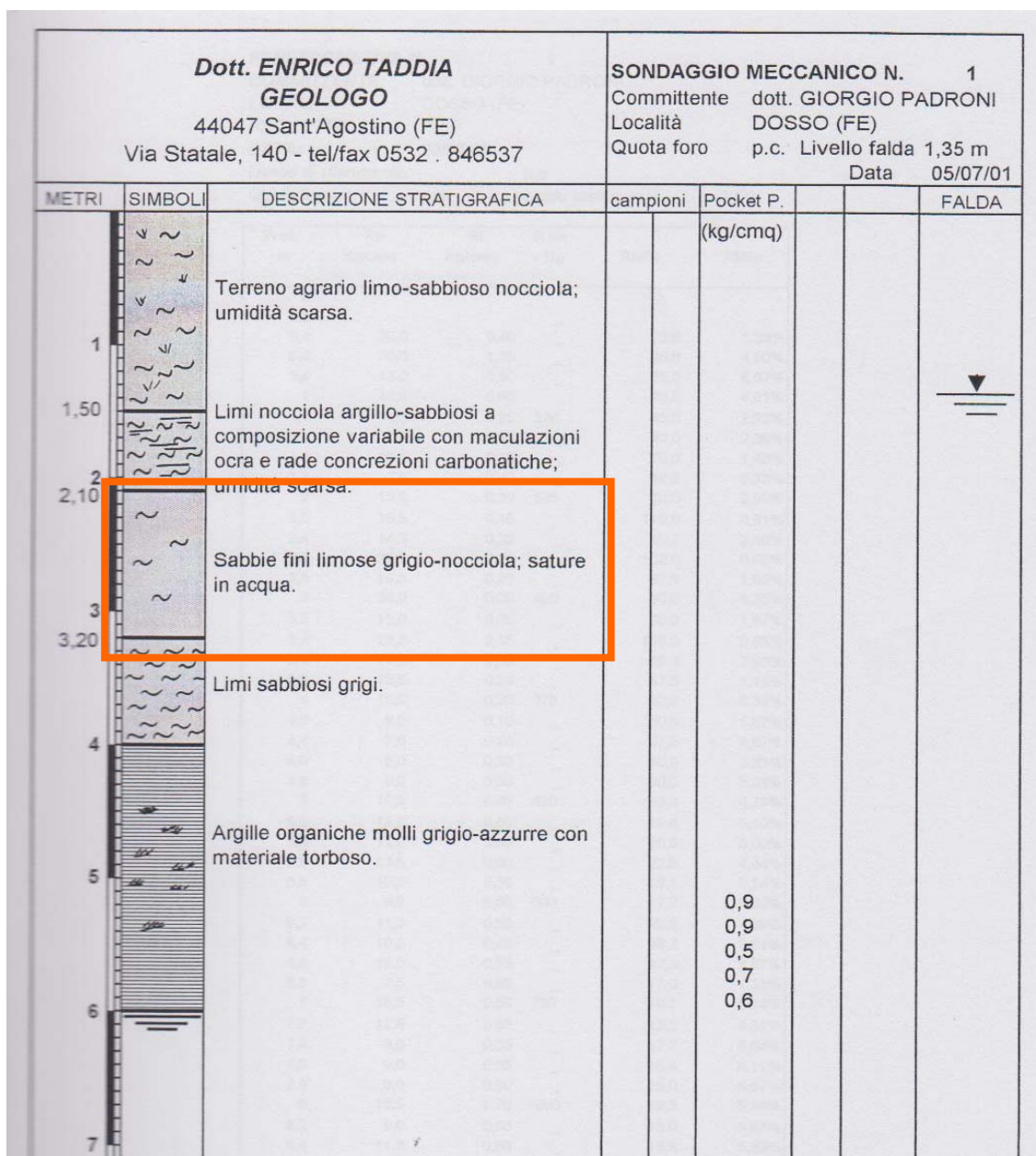


Figura 55 – Esempio di rapporto di prova di un sondaggio meccanico effettuato in località Dosso,. Il rettangolo arancione evidenzia la presenza di un livello costituito da-sabbie fine limose di spessore metrico, a ca. 2 m di profondità.

Infine, grazie alla collaborazione con il gruppo di lavoro che sta completando la microzonazione sismica nel Comune di Mirabello, è stato possibile individuare un canale abbandonato che correva parallelamente al confine fra i due comuni, in direzione ENE-WSW. Tale corso d'acqua era probabilmente più antico del paleo Reno di Sant'Agostino-San Carlo



dr. geol. CORRADO BALLOTTA - Rovigo 0425/490494-490464 ** S.Agostino 0532/84392

Rifer. : 02-95

PROVA PENETROMETR. STATICA CPT 23
DIAGRAMMI DI RESISTENZA RZ-CPT-88

PENETROMETRO STATICO tipo GOUDA da 10 t

Committente : AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI S.AGOSTINO - Ferrara -

Località : Dosso - Area n.13

note : Variante Generale al P.R.G. Comunale 1995

data : 5 Gennaio 1995

quota inizio : piano campagna

prof. falda = 1.20 m da quota inizio

scala profondità \approx 1 : 100

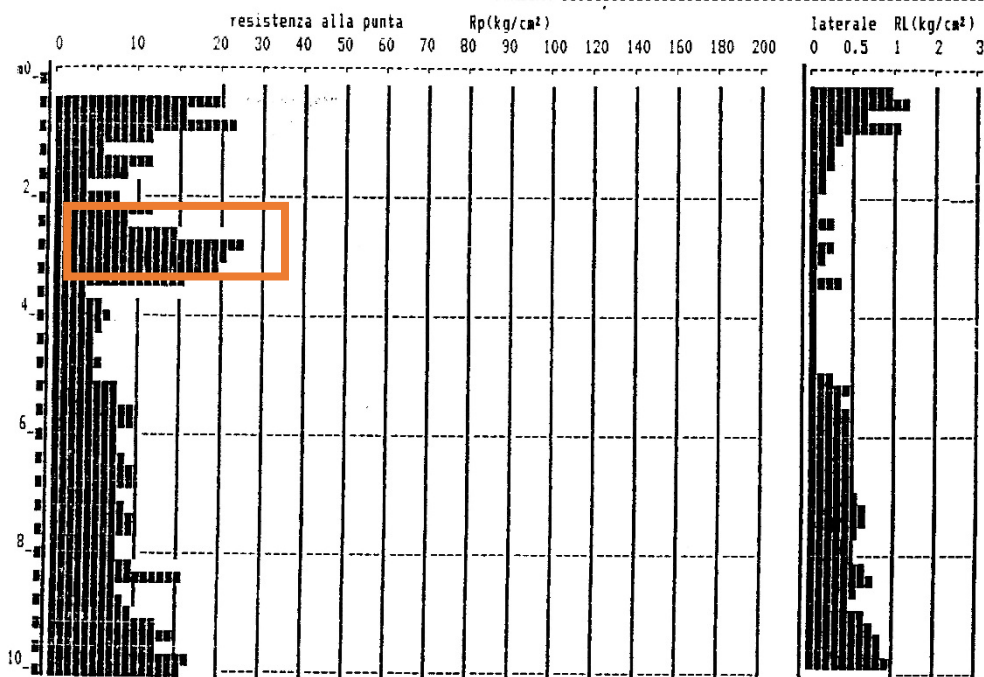


Figura 56 – Esempio di rapporto di prova CPT effettuato in località Dosso. Il rettangolo arancione evidenzia la presenza di un livello costituito da-sabbie fine limose di spessore metrico, a ca. 2.5 m di profondità..

ma non troppo in quanto i sedimenti sabbiosi associati risultano ancora relativamente superficiali tali da classificare l'area come LQ1.

Nonostante le aree finora descritte siano caratterizzate da evoluzioni paleogeografiche differenziate e di conseguenza da stratigrafie variabili da zona a zona, per le finalità del presente studio, non si è provveduto a distinguerle. Al contrario, proprio la presenza di corpi sedimentari liquefacibili con uno spessore minimo di 1 m nei primi 10 m dalla superficie ha indotto a classificarle uniformemente come LQ1.

Per quanto riguarda il restante territorio del Comune di Sant'Agostino, le aree caratterizzate dalla presenza di livelli liquefacibili, spessi almeno 2 m, a profondità comprese



tra 10 e 20 m dal piano campagna, sono state conseguentemente classificate come LQ2. Questo tipo di terreni sono stati campiti sia tra i due lobi LQ1 ad ovest di San Carlo (Figura 57), sia a SSE del paese (Figura 58), ma soprattutto formano un'ampia striscia che copre buona parte del settore occidentale del territorio comunale.

L'area LQ2, infatti, si estende dall'abitato di Dosso prima in direzione NNW-SSE e poi in direzione pressoché N-S, caratterizzata dalla presenza di spessori pluri-metrici di livelli liquefacibili a profondità variabili tra 13 e 20 m dal piano campagna. In particolare, a Dosso si



Figura 57– Esempio di rapporto di prova CPT effettuato ad ovest di San Carlo tra i due 'lobi' di LQ1. Il rettangolo verde evidenzia la presenza di un livello sabbioso di spessore maggiore di 2 m, a ca. 17 m profondità.

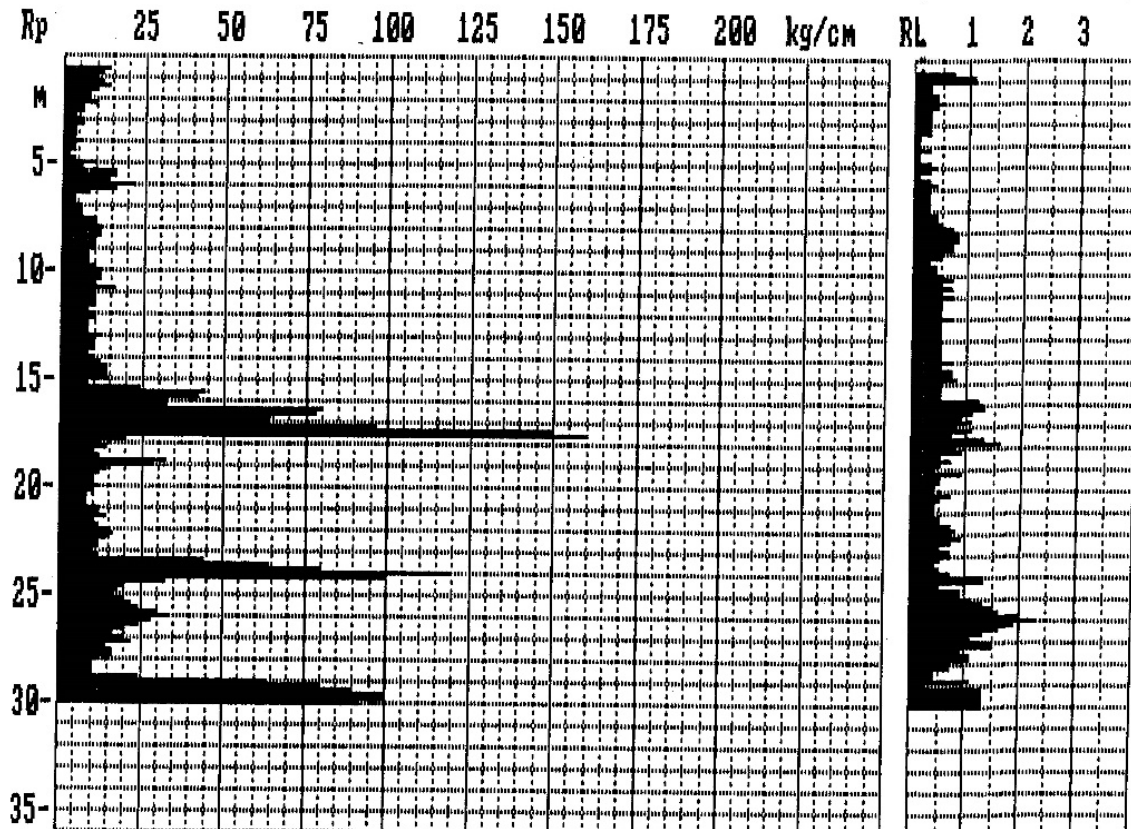


Figura 58 – Esempio di rapporto di prova CPT effettuato nell'area a SSE di San Carlo. Il rettangolo verde evidenzia la presenza di un livello sabbioso di spessore maggiore di 2 m, a ca. 15 m di profondità.

trovano a profondità comprese tra 13 e 15 m, mentre verso NNE lo spessore di questi corpi sabbioso-siltosi aumenta progressivamente raggiungendo profondità di 18 m.

Procedendo in direzione N-S, poco a NW dell'abitato di Sant'Agostino, lo spessore di questo orizzonte si riduce fino a circa 2-2.5 m, attestandosi comunque a profondità di 14.5-17 m dal piano campagna (Figura 59). Infine, procedendo ulteriormente verso N in direzione di Casumaro, questo orizzonte si trova a profondità comprese tra 15.5 e 19.5 m dal piano campagna. Si tratta probabilmente di sabbie di pianura prevalentemente di età post-glaciale (e.g. <15-18 ka) depositate da un antico canale fluviale.

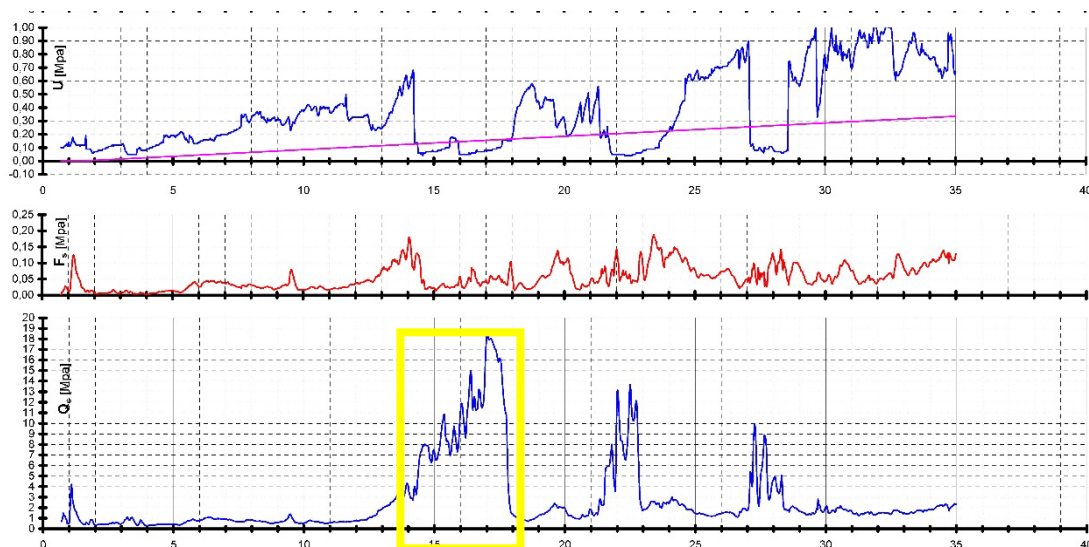


Figura 59 - Esempio di rapporto di prova CPTu. Il rettangolo giallo mostra la presenza di un corpo sabbioso, spesso cia. 3 m, a profondità di ca. 14 m dal piano campagna.

Anche in corrispondenza del confine con il Comune di Poggio Renatico è stata riscontrata la presenza di spessori importanti (fino a 8 m) di materiale sabbioso a profondità tra 10 e 20 m (Figura 60). Si tratta probabilmente di un corso d'acqua relativamente importante ma (molto) più antico del Reno attivo durante il medioevo. Le poche prove geognostiche disponibili in quell'area, non permettono di meglio ricostruire l'orientazione nel sottosuolo del corpo sabbioso associato a questo paleo corso d'acqua.

Infine, sono state individuate tre aree caratterizzate dall'assenza di livelli liquefacibili importanti nei primi 20 m dal piano campagna. Tali aree sono localizzate a ESE di San Carlo, nel settore settentrionale del comune e in una fascia ristretta ad W, in prossimità del confine con il Comune di Cento. Come mostrano i rapporti di prova riportati nelle Figure 60 e 61, la stratigrafia di queste aree è dominata da sedimenti fini prevalentemente argillosi, tipici di contesti deposizionale di interalveo.

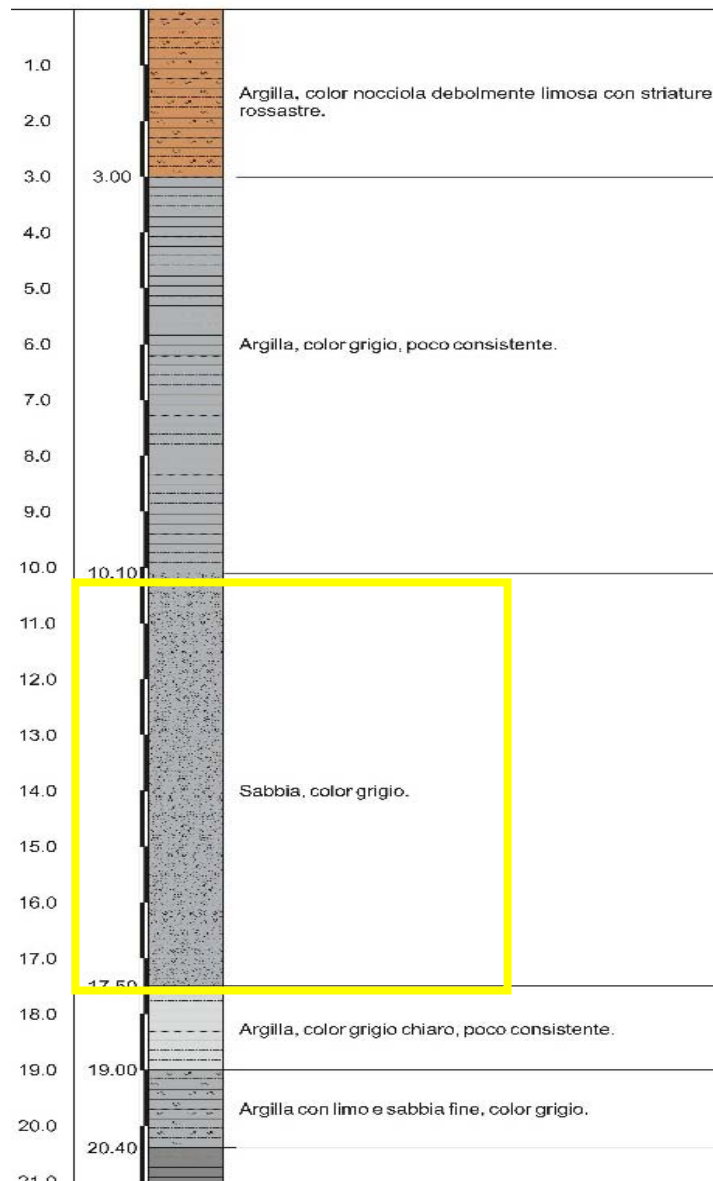


Figura 60 - Esempio di rapporto di prova di un sondaggio meccanico. Il rettangolo giallo evidenzia la presenza di un'importante spessore (ca. 8 m) di sabbie, ad una profondità di 10 m dal piano campagna.





9. Considerazioni conclusive

Il presente studio di microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino fornisce un supporto fondamentale ai fini di una futura pianificazione urbanistica consapevole, in quanto documentata, analizza e quantifica quelle che sono le criticità del territorio comunale in termini di pericolosità sismica.

Nell'ambito di questo studio, sono state individuate e delimitate le aree a comportamento omogeneo in prospettiva sismica. Alcune di esse potrebbero essere soggette a fenomeni di instabilità in conseguenza di un futuro terremoto, da moderato a forte, in particolare dal punto di vista dell'amplificazione locale del moto del suolo e da quello dei cosiddetti effetti superficiali secondari legati alla liquefazione del terreno.

Inoltre, grazie al lavoro sistematico di raccolta dati, ed alla loro omogeneizzazione ed informatizzazione, da oggi l'Amministrazione comunale disporrà di una banca dati aggiornata, completamente digitalizzata e georeferenziata. Nell'attuale banca dati sono archiviate quasi 700 tra prove geognostiche ed indagini geofisiche, più del doppio rispetto a quanto teoricamente disponibile in precedenza.

Come tutti gli studi di carattere geologico, anche questo è stato affrontato raccogliendo ed analizzando dati, facendo interpretazioni ed inferenze, avanzando ipotesi di lavoro e cercando di verificarle, il tutto opportunamente miscelato sulla base di metodologie ben consolidate nella letteratura scientifica, approcci innovativi e l'esperienza dei membri del gruppo di ricerca.

Come detto precedentemente, i numerosi risultati descritti, ma soprattutto le diverse conclusioni presentate e discusse in questa relazione tecnica e rappresentate cartograficamente nelle tavole allegate possono essere caratterizzati da un grado di attendibilità ed incertezza variabili in funzione dei vincoli geologico-geofisici al momento disponibili e delle complessità locali del sottosuolo. Questo studio, quindi, pur rappresentando un stato d'avanzamento notevole per le conoscenze del territorio di Sant'Agostino, dovrà essere considerato anche come un punto di partenza per ulteriori indagini.





Riferimenti bibliografici

- Abu-Zeid N., Bignardi S., Caputo R., Mantovani A., Tarabusi G. e Santarato G. Progetti sismologici DPC-INGV 2012-2013): "Acquisition of Vs velocity profiles across the Casaglia anticline (Ferrara Arc)", Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy, Deliverable D15, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdp/projects1/home>;
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008): "The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology", *Tectonophys.*, **453(1-4)**, 20-43; doi: 10.1016/j.tecto.2007.04.014;
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R. e Scandone P. EDS. (1992): "Structural Model of Italy, scale 1:500.000", Prog. Fin. Geodin. Quad. "La Ricerca Scientifica", C.N.R., **114 (3)**, Roma;
- Bignami, C., Burrato P., Cannelli V., Chini M., Falcucci E., Ferretti A., Gori S., Kyriakopoulos C., Melini D., Moro M., Novali F., Saroli M., Stramondo S., Valensise G. e Vannoli P. (2012): "Coseismic deformation pattern of the Emilia 2012 seismic sequence imaged by Radarsat-1 interferometry", *Ann. Geophys.*, **55 (4)**; doi:10.4401/ag-6157;
- Blake A. (1941): "On the estimation of focal depth from macroseismic data", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **31, 3**;
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. e Vannucci G. (2004): "Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250000", Regione Emilia-Romagna – CNR;
- Bondesan M. (1989): "Evoluzione geomorfologica e idrografica della pianura ferrarese", Terra ed Acqua, Corbo Editore, 14-20;
- Bondesan M. (2001): "L'evoluzione idrografica e ambientale della pianura ferrarese negli ultimi 3.000 anni", In: Storia di Ferrara, Ferrara, vol. I, pp. 228-263;
- Boccaletti M. e Guazzone G. (1974): "Remnant arcs and marginal basins in the Cenozoic development of the Mediterranean", *Nature*, **252**, 18-21;
- Burrato, P., Ciucci, F., and Valensise, G. (2003): "An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting", *Ann. Geophys.*, **46**, 865–882;
- Burrato, P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R. e Valensise G. (2012): "Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)", *Ann. Geophys.*, **55(4)**, 525-531; doi: 10.4401/ag-6182;



- Caputo R. (2005): "Ground effects of large morphogenic earthquakes", *J. Geodyn.*, **40**, 2-3, 113-118; doi: 10.1016/j.jog.2005.07.001;
- Caputo R., Iordanidou K., Minarelli L., Papathanassiou G, Poli M. E., Rapti-Caputo D., Sboras S., Stefani M. e Zanferrari A. (2012): "Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy". *Ann. Geophys.*, **55**(4); doi: 10.4401/ag-6148;
- Carminati E., Martinelli G. e Severi P. (2003): "Influence of glacial cycles and tectonics on natural subsidence in the Po Plain (northern of Italy): insights from ^{14}C ages". *Geochem. Geophys. Geosy.*, **4**, 1-14; doi: 10.1029/2002GC000481;
- Castaldini D., Gasperi G., Panizza M. e Pellegrini M. (1979): "Neotettonica dei Fogli 74 (Reggio nell'Emilia) (p.p.) e 75 (Mirandola) nell'intervallo da 18.000 B.P. all'Attuale (interv. V)", C.N.R., Nuovi contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica di Italia, Progetto Finalizzato Geodinamica, Publ. n. 251, 317-332;
- Castellaro S. (2012): "H/V: un contributo oltre Vs30", In: Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.;
- Castellaro S. e Mulargia F. (2007): Stime di vs30 da stazione singola tramite misure di HVSr vincolate. GNGTS, Roma.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005): "Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica", *Geologia Tecnica e Ambientale*, vol. 3, pp. 76-102;
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B. e Tellini C. (1999): "Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000". *Earth Surf. Proc. Land.*, **24**, 1115-1120;
- Cestari F. (2009): "Prove geotecniche in sito". Edizioni GEO-IMPIANTI SEGRATE. Terza edizione (settembre 2009), 415 pp;
- Cibin U. e Segadelli S. (2009): "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1/50.000, Foglio 203 Poggio Renatico", ISPRA, Servizio Geologico d'Italia, 104 pp;
- CNR-PFG (Progetto Finalizzato Geodinamica, 1991): "Synthetic structural-kinematic map of Italy, Structural model of Italy", Sheet n. 5. S.EL.CA., Florence;
- Cremonini S. (1988): "Specificità dell'Alto Ferrarese nella problematica evolutiva dell'antica idrografia padana inferiore", In: Bondeno ed il suo Territorio dalle Origini al Rinascimento, Grafis Ed., Bologna, 17-24;
- DAL 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione



- Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007;
- Devoti R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R. e Riguzzi F. (2011): "Evidence of large-scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary", *Earth Planet. Sci Lett.*, **311**, 1-12; doi: 10.1016/j.esppl.2011.09.034;
- DISS Working Group (2010): "Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.1.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas". <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, © INGV 2010 - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - All rights reserved; doi: 10.6092/INGV.IT-DISS3.1.1;
- Emergeo Working Group: Alessio G., Alfonsi L., Brunori C. A., Burrato P., Casula G., Cinti F. R., Civico R., Colini L., Cucci L., De Martini P. M., Falcucci E., Galadini F., Gaudiosi G., Gori S., Mariucci M.T., Montone P., Moro M., Nappi R., Nardi A., Nave R., Pantosti D., Patera A., Pesci A., Pezzo G., Pignone M., Pinzi S., Pucci S., Salvi S., Tolomei C., Vannoli P., Venuti A. e Villani F. (2013): "Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May-June 2012 (Northern Italy)", *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, **13**, 935-947; doi: 10.5194/nhess-13-935-2013;
- Ghelardoni R. (1965): "Osservazioni sulla tettonica trasversale dell'Appennino settentrionale: ipotesi paleogeografiche alternative", *Atti Tic. Sc. Terra*, **37**, 215-233;
- Gruppo di lavoro MS (2008): "Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica". Conferenza delle Regioni e Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom. http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.
- Guidoboni, E. (1994): "Riti di calamità: terremoti a Ferrara nel 1570-74", *Quad. Storici*, **55**, 107-135;
- Guidoboni, E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G. e Valensise G. (2007): "Catalogue of Strong Earthquakes in Italy from 461 B.C. to 1997 and in the Mediterranean area, from 760 B.C. to 1500. An Advanced Laboratory of Historical Seismology", <http://storing.ingv.it/cfti4med/>;
- Idriss I. M. e Boulanger R. W. (2008): "Soil liquefaction during earthquake", Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication MNO-12;
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., e Yasuda S. (1978): "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", 3rd International conference on microzonation, San Francisco, pp. 885-896;
- Kanai K. (1957): "The requisite conditions for predominant vibration of round", *Bull. Earthquake Res. Inst.*, Tokyo Univ., **31**, 457;
- Kanai K. e Tanaka T. (1961): "On Microtremor VIII", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Tokyo University, **39**, 97-114.
- Lai C. G., Bozzoni F., Mangriotis M-D. e Martinelli M. (2012): "Geotechnical Aspects of May 20, 2012 M5.1 Emilia Earthquake, Italy", EUCENTRE, July 2012;



- Lancellotta R. (2012): "Geotecnica", Zanichelli editore. Quarta edizione, 530 pp.
- Locati M., Camassi R. e Stucchi M. (2011): "DBMI11, the 2011 version of the Italian Macroseismic Database", Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>. DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11;
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M. e Piccinini D. (Progetti sismologici DPC-INGV 2012-2013): "May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity", Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>;
- Meletti C., Valensise G. (2004): "Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo", In: Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 allegati;
- Montone P., Mariucci M.T. e Pierdominici S. (2012): "The Italian present-day stress map", *Geophys. J. Int.*, 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x;
- MURST (1997a): "Geomorphological Map of the Po Plain, 3 sheets, scale 1:250.000". S.EL.CA., Firenze;
- Nakamura Y. (1989): "A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface", *QR of RTRI*, 30, 25-33;
- Nogoshi M. e Igarashi T. (1970): "On the propagation characteristics of microtremors", *J. Seism. Soc. Japan*, 23, 264-280;
- Okada Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75, 1135-1154.
- Papathanassiou G., Caputo R. e Rapti-Caputo D. (2012): "Liquefaction-induced ground effects triggered by the 20th May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake". *Ann. Geophys.*, 55(4), doi: 10.4401/ag-6147;
- Pasolini C., Gasperini P., Albarello D., Lolli B. e D'Amico V. (2008): "The Attenuation of Seismic Intensity in Italy, Part I: Theoretical and Empirical Backgrounds", *Bull Seism. Soc. Am.*, Vol. 98(2), 682-691;
- Pieri M. e Groppi G. (1981): "Subsurface Geological Structure of the Po Plain, Italy", C.N.R., P.F. Geodinamica, pubbl. n. 414, 13 pp;
- Pondrelli, S., Salimbeni S., Perfetti P. e Danecek P. (2012): "Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence", *Ann. Geophys.*, 55(4); doi: 10.4401/ag-6146;



- Principi G. e B. Treves B. (1984): "Il sistema corso-appenninico come prisma d'accrezione. Riflessi sul problema generale del limite Alpi-Appennini", *Mem. Soc. Geol. It.*, **28**, 1984, pp. 549-576
- Priolo E., Romanelli M., Barnaba C., Mucciarelli M., Laurenzano G., Dall'Olio L., Abu-Zeid N., Caputo R., Santarato G., Vignola L., Lizza C. e Di Bartolomeo P. (2012): "The Ferrara Thrusts Earthquakes of May-June 2012 – Preliminary Site Response Analysis at the Sites of The OGS Temporary Network". *Ann. Geophys.*, **55(4)**, 7 pp., doi: 10.4401/ag-6172;
- RER & ENI-Agip (1998): "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna", a cura di G. M. Di Dio, Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione & Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp. 120.
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F. M., Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F. P., Mandiello A. G., Marocci C., Mazza S., Pintore S. e Quintiliani M. (2012): "The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes", *Ann. Geophys.*, **55(4)**; doi: 10.4401/ag-6159;
- SESAME (2005): "Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation", SESAME European research project, WP12 – Deliverable D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujfgrenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf;
- Sieberg A. (1930): "Geologie der Erdbeben Handboch der Geophysic", 4, 552-554;
- Sonmez H. (2003): "Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for aliuefaction-prone area (Inegol-Turkey)", *Env. Geology*, **44(7)**, 862–871;
- Zywicki D.J. (1999): "Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves", Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.