



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

SEZIONE GEOTECNICA



RAPPORTO PRELIMINARE SUI DIFFUSI FENOMENI DI LIQUEFAZIONE VERIFICATISI DURANTE IL TERREMOTO IN PIANURA PADANA EMILIANA DEL MAGGIO 2012

31 maggio 2012

Crespellani T., Facciorusso J., Ghinelli A., Madiati C., Renzi S., Vannucchi G.

INDICE

1. Introduzione
2. Il fenomeno della liquefazione: fattori 'predisponenti' e 'fattori scatenanti'
3. Alcune caratteristiche dei 'fattori predisponenti' nelle aree osservate
4. Considerazioni preliminari sulle caratteristiche del 'fattore scatenante'
5. Brevi considerazioni sulle prove disponibili
6. Considerazioni preliminari sugli effetti osservati e ipotesi di lavoro
7. Immagini delle manifestazioni osservate

1. INTRODUZIONE

A seguito della segnalazione di fenomeni di liquefazione indotti nelle aree colpite dal terremoto del 20/05/2012 e su invito del Dott. Luca Martelli del Servizio Geologico e Sismico dei Suoli della Regione Emilia-Romagna a recarsi sui luoghi maggiormente interessati da tali fenomeni, in data 21/05/2012 una squadra di docenti e ricercatori della Sezione Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Firenze, composta dal Prof. Giovanni Vannucchi, Prof.ssa Claudia Madaia, Ing. Johann Facciorusso, Ing. Alberto Puliti, Dr. Geol. Maria Manuel, ha effettuato un sopralluogo nelle zone di San Carlo, Mirabello e Finale Emilia per una prima rilevazione delle manifestazioni (Figura 1). Ulteriori sopralluoghi e rilevazioni nei siti di San Carlo, Mirabello e Dodici Morelli sono stati effettuati in data 25/05/2012 dalla Prof.ssa Teresa Crespellani e dall'Ing. Facciorusso, in data 26/05/2012 dall'Ing. Alessandro Ghinelli e dall'Ing. Stefano Renzi, in data 28/05/2012 dall' Ing. Johann Facciorusso e dall'Ing. Alessandro Ghinelli. A seguito della scossa del 29/05/2012 è stato eseguito dall'Ing. Stefano Renzi un nuovo sopralluogo sugli stessi siti già visitati in precedenza. In Figura 1 sono ubicati i comuni nei quali sono stati effettuati i sopralluoghi e gli epicentri delle principali scosse (si veda la Tabella 1).

Oltre all'osservazione e alla rilevazione fotografica delle evidenze di liquefazione (vulcanelli, cedimenti, lateral spreading, sollevamenti del terreno, rotture, ecc.), sono state determinate le coordinate dei luoghi interessati dal fenomeno e sono stati prelevati campioni del materiale fuoriuscito per studiarne la distribuzione granulometrica nel Laboratorio di Geotecnica del DICEA. Sono state anche effettuate delle ricognizioni sugli effetti della liquefazione su numerosi edifici presenti nella zona. L'osservazione sul campo delle manifestazioni di liquefazione è stata arricchita da notizie e da testimonianze degli abitanti che in alcuni casi hanno fornito elementi interessanti sulle tecniche fondali, sui livelli dell'acqua prima e dopo la scossa sismica principale.

Sebbene i casi di liquefazione riscontrati siano risultati piuttosto diffusi ed estesi a tutta l'area colpita dal terremoto e spesso con manifestazioni evidenti e spettacolari, si è deciso, in questa prima fase di emergenza, di concentrare l'attenzione su quei siti dove il fenomeno sembra avere influenzato maggiormente la stabilità degli edifici e del loro sistema di fondazioni, ovvero nei centri abitati di San Carlo e Mirabello.

Dopo alcuni brevi richiami sulla liquefazione dei terreni durante i terremoti, utili ai fini dell'inquadramento dei fenomeni riscontrati nel caso specifico, vengono svolte alcune considerazioni preliminari come contributo alla identificazione del tipo di indagini da effettuare sia per approfondire le dinamiche del fenomeno sotto il profilo scientifico sia in vista delle operazioni che dovranno essere condotte nel breve e medio periodo. Quindi verrà fornito un quadro sintetico delle informazioni geologiche e geotecniche disponibili anche attraverso una breve disamina delle indagini estratte dalla banca dati della Regione Emilia-Romagna, con qualche breve cenno storico circa l'evoluzione dell'uso del territorio negli ultimi secoli.

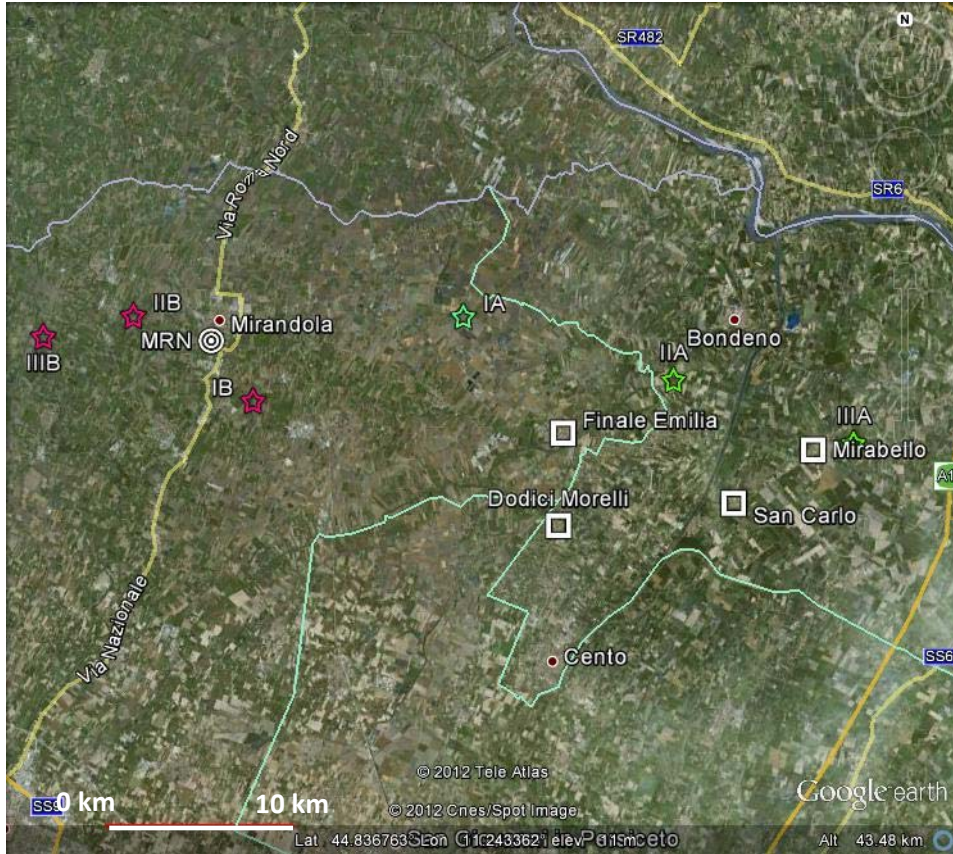


Figura 1 - Ubicazione dei sopralluoghi effettuati e degli epicentri degli eventi di maggiore intensità (si veda la Tab.1)

2. IL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE: FATTORI 'PREDISPONENTI' E 'FATTORE 'SCATENANTE'

In termini molto sintetici, con il termine 'liquefazione' si indicano vari fenomeni fisici (liquefazione ciclica, mobilità ciclica, fluidificazione), osservati nei depositi e nei pendii sabbiosi saturi durante i terremoti forti ($M > 5.5$), che hanno come elemento comune il fatto che, per effetto dell'instaurarsi di condizioni non drenate, *si ha un incremento e un accumulo delle pressioni interstiziali che può provocare una drastica caduta della resistenza al taglio* e quindi una perdita di capacità portante del terreno.

Le condizioni fisiche e le manifestazioni della liquefazione dei tre diversi tipi di fenomeni sono differenti. Con il termine liquefazione ciclica si intende il fenomeno di liquefazione in condizioni di *free field* mentre la mobilità ciclica e la fluidificazione si riferiscono a condizioni di sottosuolo in cui il terreno prima dell'arrivo del sisma è sottoposto a sforzi di taglio preesistenti (in presenza di costruzioni e/o condizioni di pendio). La severità del danno prodotta dai vari tipi di fenomeni è molto diversa. In particolare: la liquefazione ciclica non produce danno (solo in caso di falda molto superficiale e di azione sismica violenta può produrre l'emergere della falda); la mobilità ciclica produce deformazioni

permanenti di varia entità; la fluidificazione del terreno produce in genere danni elevati e scorrimenti del terreno.

Secondo una classifica internazionale le manifestazioni della liquefazione sono:

- crateri, vulcanelli, fuoriuscite di acqua e sabbia,
- grandi oscillazioni e rotture del terreno,
- abbassamenti e sollevamenti del terreno,
- movimenti orizzontali del terreno (*lateral spreading*),
- movimento di masse fluide / collasso in pendii naturali e artificiali,
- perdita di capacità portante delle fondazioni,
- galleggiamento di opere sotterranee,
- collasso di opere di sostegno e banchine portuali.

Per quanto riguarda l'occorrenza della liquefazione, l'esperienza ha dimostrato che la liquefazione avviene quando sono verificate *simultaneamente* alcune condizioni che riguardano

- la "predisposizione" del terreno al verificarsi del fenomeno (esistenza di "fattori predisponenti");
- alcune condizioni che riguardano le caratteristiche dell'azione sismica ("fattore scatenante").

Le *condizioni predisponenti* del terreno sono:

- profondità dello strato potenzialmente liquefacibile < 15-20 m dal p.c.
- profondità della falda < 5 m
- densità relativa $D_r < 60\%$
- diametro medio $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$
- frazione di fini (diametro < 0.005 mm) < 15%

Tra i fattori geologici e geotecnici risultano fondamentali, oltre alla profondità della falda (<5 m), la presenza e lo spessore degli strati non liquefacibili superficiali, l'assenza di cementazione fra i grani, l'origine e l'età del deposito, la presenza di strati drenanti grossolani intercalati alla sabbia fine liquefacibile, la morfologia. Tra i fattori geotecnici: lo stato di addensamento (D_r , e), la granulometria (D_{50} , U , CF , forma dei grani), il grado di saturazione (S_r), le condizioni di drenaggio (parziale o completo), lo stato tensionale efficace iniziale, la storia tensionale e deformativa (OCR , K_0). Di particolare importanza è risultata, alla luce delle esperienze più recenti, la presenza di sforzi iniziali di taglio necessari per l'equilibrio (driving stresses) e il loro rapporto con la resistenza al taglio non drenata.

Le *condizioni scatenanti* che riguardano le caratteristiche dell'azione sismica sono:

- magnitudo > 5.5
- $PGA > 0.15 \text{ g}$
- durata > 15-20 sec

Per quanto riguarda la natura geologica dei siti le zone a più alto rischio sono: letti di fiume antichi e recenti, paludi, terreni di bonifica, argini, pianure di esondazione, spiagge, zone dunari e interdunari, ecc.

L'evidenza sperimentale è che, allorquando si verificano eventi di intensità maggiore della soglia minima necessaria per scatenare il fenomeno, la liquefazione tende a ripetersi negli stessi siti dove si è storicamente manifestata.

Infine è da sottolineare che in uno stesso sito durante lo stesso terremoto gli effetti della liquefazione possono essere di diversa gravità *in campo libero e in presenza di costruzioni*. La severità del danno alle costruzioni dipende infatti non solo dalla natura del terreno ma anche dalle caratteristiche geometriche e strutturali (dimensioni in pianta, numero dei piani, materiali di costruzione, caratteristiche di rigidità, carichi trasmessi in fondazione, tecniche fondali, profondità del piano di fondazione, presenza di vespai e di trincee drenanti intorno all'edificio, ecc.). *Quindi l'agibilità di un edificio in una zona che è stata interessata da fenomeni di liquefazione deve essere rapportata a tali fattori.*

3. ALCUNE CARATTERISTICHE DEI "FATTORI PREDISPONENTI" NELLE AREE OSSERVATE

Sulla base dei dati storici, la zona in cui sono stati rilevati i fenomeni di liquefazione rientra tra le aree di pianura alluvionali all'interno delle quali, durante terremoti di intensità analoga a quella dell'evento principale del 20/05/2012, vi sono stati precedenti casi di liquefazione (Galli & Meloni, 1993; Baratta, 1901).

La zona è considerata quindi tra quelle ritenute geologicamente suscettibili di liquefazione per la presenza negli strati superficiali di depositi sabbioso-limosi di origine recente.

Ma è da sottolineare che in tale zona le forme fisiche dell'ambiente sono state visibilmente modellate dall'uomo con un lavoro di decine di secoli che ha comportato moltissimi interventi di difesa dalle alluvioni e dai ristagni nelle grandi depressioni interfluviali. Tali interventi sono stati sempre più frequenti a partire dal 1500. La pianura in questa zona è attraversata da antichi drenaggi e da torrenti che percorrono i terreni per impaludarsi e perdersi nel sottosuolo.

Nel corso del tempo, l'attività agricola si è insediata occupando i dossi naturali costruiti dai fiumi e dai loro rami abbandonati, estendendosi alle zone circostanti anche con riempimenti del terreno. Da alcuni studi storici (Cazzola, 1997) risulta che per i riempimenti delle casse di colmata venissero utilizzati particolari limi in quanto ritenuti fertilissimi.

È soprattutto con l'unità di Italia che, per incentivare un più rapido sviluppo dell'agricoltura, in tutta la regione fu dato impulso a spettacolari opere di bonifica con tre tipi di azioni: colmate, scoli naturali e sollevamenti meccanici delle acque. In molte zone le acque torbide dei fiumi sono state deviate in comprensori delimitati da argini, che occupano attualmente una larga parte del territorio. Dagli anni '60 in poi, l'avanzata accelerata dell'industria e dell'espansione urbana ha portato ad utilizzare anche le aree che erano state bonificate per uso agricolo, insediandosi sui terreni di colmata e sugli argini.

Ci si è soffermati su questa ricostruzione storica per due motivi:

- 1) perché tutti i casi osservati sembrano rientrare proprio in zone interessate dalla colmata di vecchi alvei ed argini (prevalentemente dei Fiumi Reno e Panaro);
- 2) perché, nella programmazione delle eventuali indagini sul terreno, è importante prima identificare la geometria delle colmate, dei vecchi e nuovi argini, nonché la profondità dello strato argilloso di base, e quindi stimare le principali proprietà meccaniche, in campo statico e dinamico, delle litologie identificate, tenendo conto della grande eterogeneità spaziale delle caratteristiche del terreno negli strati superficiali e quindi le difficoltà di generalizzazione dei risultati ottenibili.

Per quanto riguarda i livelli di falda, dagli studi condotti dalla Regione Emilia-Romagna risulta che in tali zone i livelli sono molto superficiali e addirittura la distanza dalla superficie è mediamente compresa tra 80 e 130 cm.

Sulle caratteristiche granulometriche si attendono i risultati delle prove di laboratorio, ma l'evidenza visiva e tattile del materiale fuoriuscito indica un limo-sabbioso finissimo a granulometria uniforme, che presenta una percentuale di sabbia variabile, in alcuni casi maggiori (ad esempio in corrispondenza della sponda sinistra del vecchio alveo del Reno, prima che questo venisse deviato in seguito alle bonifiche di cui si è detto).

4. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SULLE CARATTERISTICHE DEL 'FATTORE SCATENANTE'

La lunga, e ancora non terminata, sequenza di scosse che ha colpito principalmente le province di Modena e Ferrara, è caratterizzata, al momento, da due sequenze di eventi distinte, riconducibili quindi a due differenti sistemi di rottura (anche se con ogni probabilità tra loro collegati, almeno in termini di causa-effetto, e comunque paralleli). La prima sequenza, iniziata il 20/05/2012 ha generato uno sciame sismico in cui è possibile identificare tre scosse significative con magnitudo superiore a 5 (di cui sono riportate le principali caratteristiche in Tabella 1). Tali eventi sono tra loro confrontabili in termini di profondità e localizzazione dell'ipocentro, anche se caratterizzati da un progressivo avvicinamento dell'ipocentro alla superficie e alle zone maggiormente interessate dai fenomeni di liquefazione (in particolare il comune di Mirabello), come meglio mostrato in Figura 2 (dove le aree oggetto dei sopralluoghi sono cerchiare in nero).

La seconda sequenza di eventi, anch'essa con 3 scosse principali di magnitudo locale superiore a 5, è invece localizzata più ad occidente, verso il margine appenninico, e quindi più distante dalle zone di studio. Il tipo di meccanismo focale indica, in entrambe le sequenze di eventi, un meccanismo compressivo con direzione di massima compressione nord-sud e piani di faglia orientati est-ovest. Le principali caratteristiche delle più importanti scosse della seconda sequenza e la localizzazione degli epicentri rispetto alle zone di interesse sono riportate rispettivamente in Tabella 1 e in Figura 2.

Tabella 1. – Principali caratteristiche degli eventi più importanti ($M_L > 5$) delle due sequenze del 20/05/2012 e del 29/05/2012

ID	Data	Ora (UTC)	Lat.	Long.	Prof. (km)	ML	Distretto Sismico
IA	20/05/12	02.03.53	44,89°	11,23°	6,3	5,9	Pianura_padana_emiliana
IIA	20/05/12	02.07.31	44,86°	11,37°	5	5,1	Pianura_padana_emiliana
IIIA	20/05/12	13.18.02	44,83°	11,49°	4,7	5,1	Pianura_padana_emiliana
IB	29/05/12	07.00.03	44,85°	11,09°	10,2	5,8	Pianura_padana_emiliana
IIB	29/05/12	10.55.57	44,89°	11,01°	6.8	5,3	Pianura_padana_emiliana
IIIB	29/05/12	11.00.25	44,88°	10,95°	5.4	5,2	Pianura_padana_emiliana

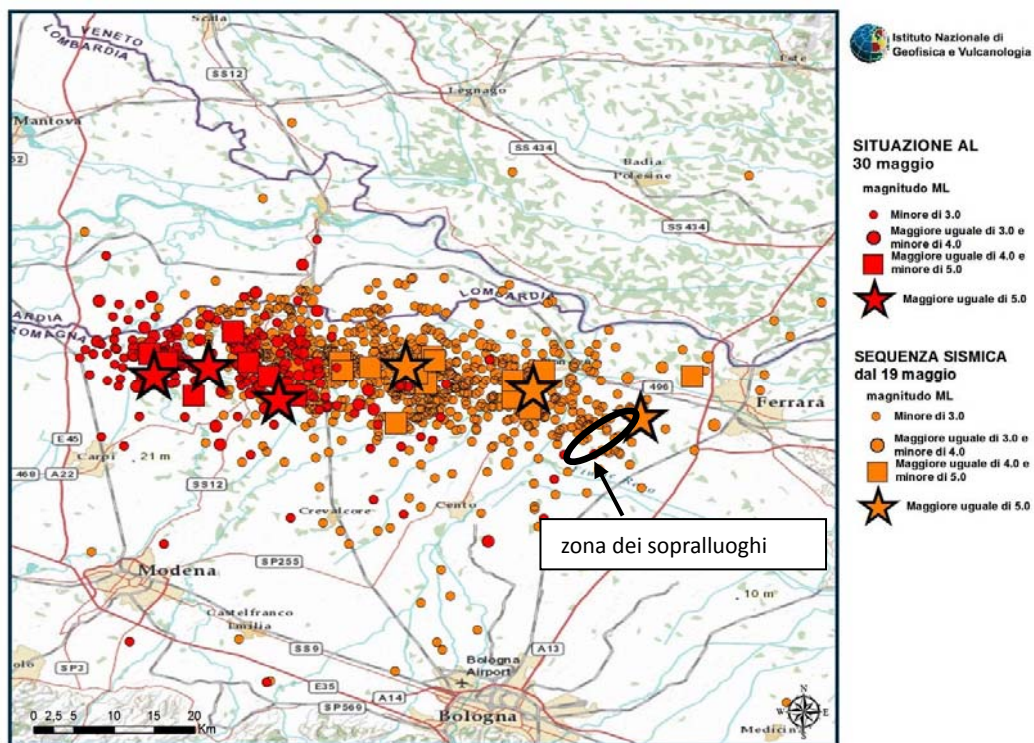


Figura 2 - Localizzazione degli epicentri e magnitudo, delle due serie di eventi del 20/05/2012 e del 29/05/2012 rispetto all'area oggetto dei sopralluoghi (aggiornata 30 maggio 2012) (www.ingv.it).

Di tali eventi, quello che si ritiene responsabile dei diffusi e intensi fenomeni di liquefazione osservati, è, in base anche alle testimonianze dirette della popolazione, l'evento di maggiore magnitudo locale $M_L = 5.9$ (USGS indica una magnitudo momento

M_w di 6.0) delle 4.03, ora locale, del 20/05/2012, localizzato ad una profondità di 6.3 km e ad una distanza media dall'area in cui sono manifestati più diffusamente i fenomeni di liquefazione di circa 17 km. Si ritiene inoltre, che il secondo evento, verificatosi a soli tre minuti circa di distanza, abbia determinato con il primo un'unica sequenza ciclica di carico, quindi di notevole durata, e che possa avere contribuito ad accentuare i fenomeni di liquefazione già attivati con la prima scossa, essendo, come noto, la liquefazione particolarmente sensibile alla durata dell'evento. Ovviamente, tale ipotesi potrà essere confermata mediante più approfonditi studi e simulazioni numeriche. A questo si aggiunga che la seconda scossa è risultata più superficiale (5 km di profondità) e prossima ai siti dove la liquefazione è stata osservata (circa 7 km). La stazione di registrazione più vicina, ubicata a Mirandola (MRN), si trova ad una distanza di 13.3 km dall'epicentro dell'evento più significativo (IA di Figura 1) e ad una distanza media dai siti osservati di circa 30 km. Il picco massimo d'accelerazione registrato, in occasione dell'evento più forte (IA) è di 0.309 g, e, come mostrato in Figura 3, corrisponde alla componente verticale (UP-DOWN). Inferiori risultano i picchi corrispondenti alle due componenti orizzontali (0.264 in direzione SUD-NORD e 0.261 in direzione OVEST-EST). Per quanto riguarda la durata, si può stimare una *bracketed duration* di circa 8.1 s (con riferimento alla componente N-S), mentre, con riferimento allo spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione (Figura 4) relativo alla medesima componente di accelerazione, si può osservare che alla massima pseudo accelerazione corrisponde un periodo di circa 0.26 s.

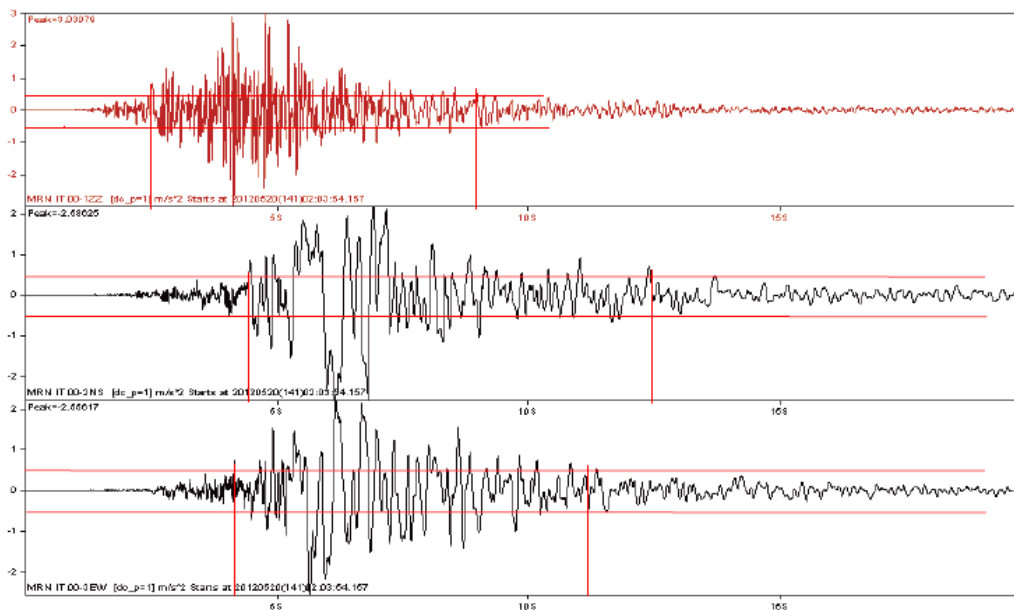


Figura 3 – Registrazioni delle tre componenti, Up-Down, Nord-Sud ed Est-Ovest, dell'accelerazione (in m/s^2) in corrispondenza della stazione di Mirandola durante l'evento I1 (vedi Tabella1) (www.ingv.it).

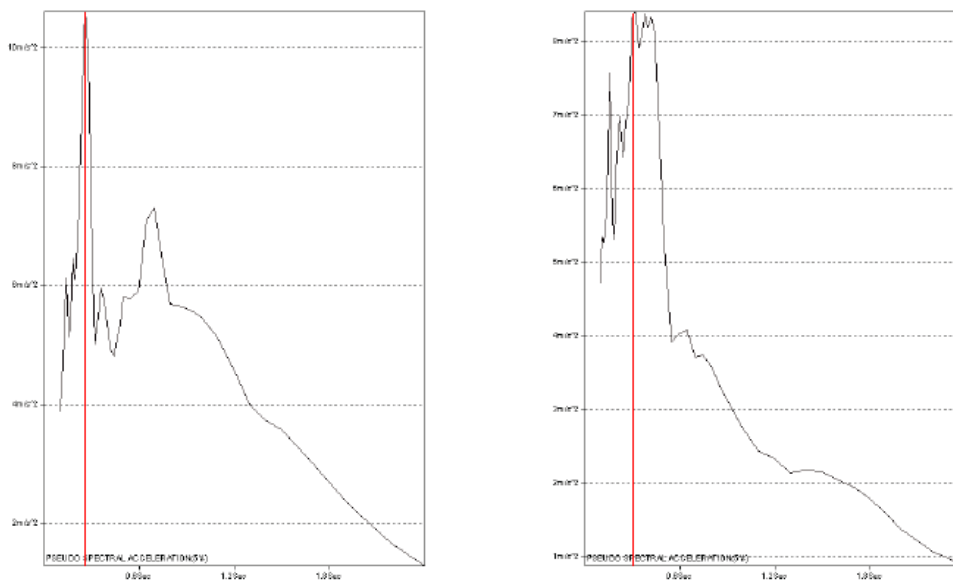


Figura 4 – Spettri di risposta elastici in pseudo-accelerazione rispettivamente della componente Nord-Sud ed Est-Ovest riportate in Figura 3 (smorzamento del 5%, accelerazione in m/s^2 e tempo in s).

La seconda serie di scosse del 29/05/2012 non sembra avere attivato nuovi fenomeni di liquefazione nelle aree osservate (tranne un caso a Mirabello che verrà mostrato più avanti), a causa probabilmente della minore entità e della maggiore distanza epicentrale degli eventi. Sembra invece che si siano attivati nuovi casi nelle aree in prossimità dell'epicentro, anche se di dimensioni più limitate e di natura sporadica.

La mappa delle repliche dei due eventi principali rispettivamente del 20/05/2012 e del 29/05/2012 rilevabile dal sito dell'INGV (www.ingv.it) e riprodotta nella Figura 2, mostra un allineamento est-ovest per circa 40 km tra le province di Modena e Ferrara. Alla data del 31/05/2012 (15:30:01 UTC) sono stati complessivamente rilevati 1131 eventi di cui, oltre ai già citati 6 eventi di magnitudo compresa tra 5 e 6 (Tab.1), ve ne sono 25 di magnitudo compresa tra 4 e 5 e 143 di magnitudo compresa tra 3 e 4.

Secondo l'INGV, le informazioni storiche per l'area sismogenetica (912), nella quale rientrano le zone interessate dal fenomeno della liquefazione, evidenziano un'attività non molto frequente, con alcuni terremoti significativi nelle aree adiacenti. Sotto il profilo storico (Figura 5), per ritrovare nel ferrarese un evento di severità comparabile (in termini di intensità macrosismica) a quello principale del 20/05/2012 e del 29/05/2012, occorre risalire al terremoto del 17 novembre 1570 durante il quale nell'area di Ferrara, circa 30 km a est dell'epicentro dell'evento odierno, secondo quanto riporta il Baratta (1901), furono osservati dei fenomeni di liquefazione: *“Fra gli effetti prodotti da questo terremoto devonsi notare i rombi sotterranei, i bagliori repentini nell'atmosfera, il gonfiamento improvviso delle acque del Po, certe elevazioni ed avallamenti del suolo fuori porta S. Pietro e S. Paolo, alla torre della Fossa ed altrove nei Polesini di S. Giorgio e di S. Giovanni Battista, ove avvennero pure emissioni violente di*

acqua nerastra e di arena”. La scossa maggiore fu preceduta da scosse minori e ci furono repliche per oltre tre anni.

Un altro evento storico di interesse, studiato di recente, è quello avvenuto nel 1639 con epicentro nei pressi di Finale Emilia, dove produsse effetti del VII-VIII grado MCS.

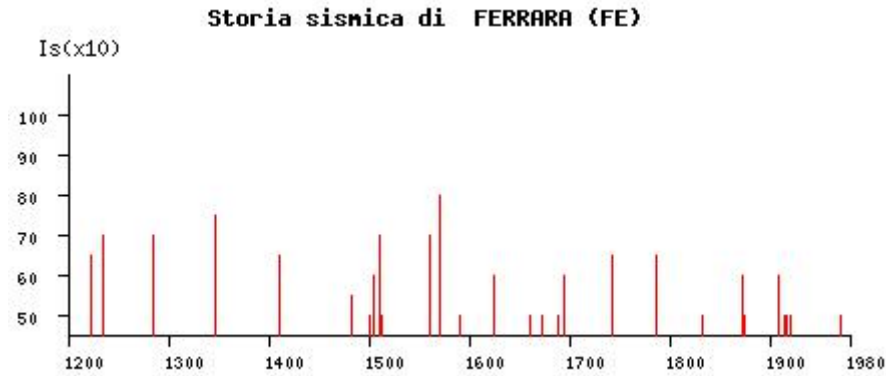


Figura 5 – Storia sismica di Ferrara

In Figura 6 è infine riportata la localizzazione degli epicentri relativi alla prima sequenza di eventi rispetto gli epicentri dei terremoti storici (quadrati arancio) che mostrano la maggiore attività del settore appenninico settentrionale, dove infatti il livello di pericolosità è maggiore, rispetto alla zona padana.



Figura 6 - Mappa degli epicentri della prima sequenza di eventi aggiornata alle 18.30 del 20 maggio 2012 (riportati in rosso e distinti per classi di magnitudo) e dei terremoti storici (quadrati arancio) (dal sito www.ingv.it)

5. BREVI CONSIDERAZIONI SULLE PROVE DISPONIBILI

In Figura 7 è riportata una mappa delle principali indagini disponibili per l'area in esame nella banca-dati della Regione Emilia Romagna.

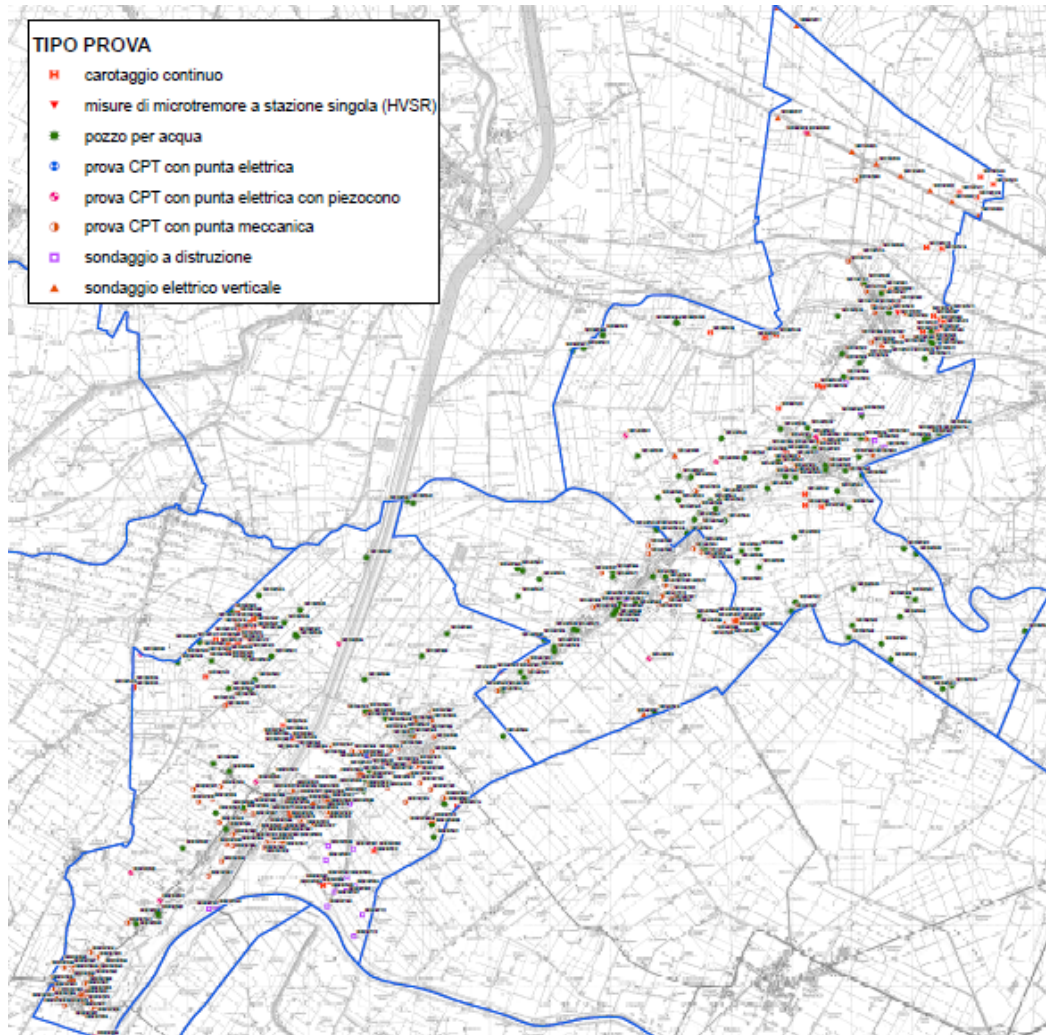


Figura 7 – Carta dei sondaggi e delle prove CPT disponibili per le aree interessate dai fenomeni di liquefazione nella banca-dati della Regione Emilia-Romagna

Per quanto riguarda Mirabello, sono disponibili numerosi pozzi, con stratigrafie di scarso dettaglio soprattutto nella zona superficiale, di maggiore interesse per la liquefazione. Le prove CPT sono risultate tutte di tipo meccanico e limitate ai primi 8 m di profondità. Le poche misurazioni del livello di falda indicano un livello molto superficiale (1-2 m dal piano di campagna) che corrisponde all'incirca alle segnalazioni dei proprietari dei pozzi relative ai giorni immediatamente precedenti il sisma. A titolo di esempio viene riportata in Figura 8 la stratigrafia di uno dei due sondaggi disponibili, eseguiti in prossimità del campo sportivo e del cimitero, dove sono state riscontrate spaccature nel terreno con fuoriuscita di acqua e sabbia (Figura 11). Tale stratigrafia, sebbene poco profonda, segnala livelli superficiali di sabbia fine limosa (grigio-azzurra, ovvero dello stesso colore del materiale fuoriuscito) intercalati a livelli più argillosi.

```

*****
*prof|LITOLOGIA|DESCRIZIONE LITOLOGICA|N.CAMP.*
* mt |          |          |          *
*****
*    |          |          |          *
*    |---...*| sabbia fine limosa |          *0.2
*    |          | con resti vegetali |          *0.4
*    | * - * * | ed intercalazioni  |          *0.6
*    | - * - * | argillose           |          *0.8
*    |          |                    |          *1.0
*    |          |                    |          *1.2
*1.40|-----|                    |          *1.4
*    |...-...-| limo deb.argilloso |          *1.6
*    | - . . . |                    |          *1.8
*2.00|-----|                    |          *2.0
*    |--- -- --| argilla legg.limosa |          *2.2
*    |          | grigio azzurra con  |          *2.4
*2.60|-----| resti vegetali-----|          *2.6
*    | * * * * |                    |          *2.8
*    | - - - - | limo sabbioso     |          *3.0
*3.20|-----|                    |          *3.2
*    | * * * * | sabbia medio fine  |          *3.4
*    |          | grigio-azzurra     |          *3.6
*    | * * * * |                    |          *3.8
*4.00|-----|                    |          *4.0
*    | * * . * | sabbia fine limosa |          *4.2
*    | * . * . |                    |          *4.4
*4.60|-----|                    |          *4.6
*    | - - - - | argilla plastica   |          *4.8
*5.00|-----|                    |          *5.0
*    | . - . - |                    |          *5.2
*    |          |                    |          *5.4
*    |.. . - -| argilla limosa con |          *5.6
*    |          | abb.resti vegetali |          *5.8
*6.00|-----|                    |          *6.0

```

Figura 8- Stratigrafia del sondaggio 185140P016(Mirabello)

Per quanto riguarda invece San Carlo sono disponibili, oltre alle stratigrafie desunte dai pozzi e ai profili di prove CPT meccaniche (sempre molto superficiali), due sondaggi a carotaggio continuo condotti fino a 40 m di profondità e 4 prove CPT elettriche condotte fino a 50 m di profondità. Anche in questo caso il livello di falda segnalato è molto superficiale (intorno ai 3 m di profondità dal piano di campagna). In Figura 9 è riportata la stratigrafia desunta da uno dei sondaggi che identifica chiaramente la presenza di un livello superficiale di limo nei primi 2 m, seguito da uno strato di sabbia fine limosa grigia, riconducibile con molta probabilità a terreno di riempimento (arginale o in alveo), fino ad una profondità di circa 8 m, dove inizia uno strato argilloso riconducibile al basamento sedimentario. Lo strato sabbioso identificato è quello che, con molta probabilità, ha dato luogo ai fenomeni di liquefazione, come confermato dall'analisi di pericolosità di liquefazione condotta in un precedente studio su una delle prove CPT elettriche disponibili (la cui ubicazione è riportata in Figura 12). L'analisi è stata eseguita con il metodo di Robertson e Wride (1997), assumendo una magnitudo attesa pari a quella corrispondente alla zona sismogenetica di appartenenza del sito ($M_W = 6.14$) e un'accelerazione su terreno rigido di riferimento pari a quella stimata (per un periodo di ritorno di 475 anni) per il sito dall'analisi di pericolosità sismica di base nazionale ($a_g = 0.153 g$). Non disponendo ancora di dati sufficienti per un'analisi della risposta sismica locale, che dovranno essere reperiti con nuove indagini mirate, era stato ipotizzato un terreno di categoria D, a cui corrisponde un fattore di amplificazione stratigrafica $S_s =$

1.8 e quindi un'accelerazione massima orizzontale in superficie di 0.275 g (coerente con quella misurata a Mirandola). La falda era stata assunta a 1.1m di profondità dal piano di campagna. Come mostrato in Figura 10 gli strati maggiormente liquefacibili identificati nell'ambito delle suddette analisi si collocano esattamente tra 2 e 6 m. Occorre tuttavia sottolineare che, data la natura e l'origine probabilmente antropica di tali strati sabbiosi, essi, come confermato dai sondaggi disponibili, tendono a mostrare una notevole eterogeneità e variabilità in direzione orizzontale, specie nel contenuto di limo, che ovviamente deve essere approfondita con nuove indagini.

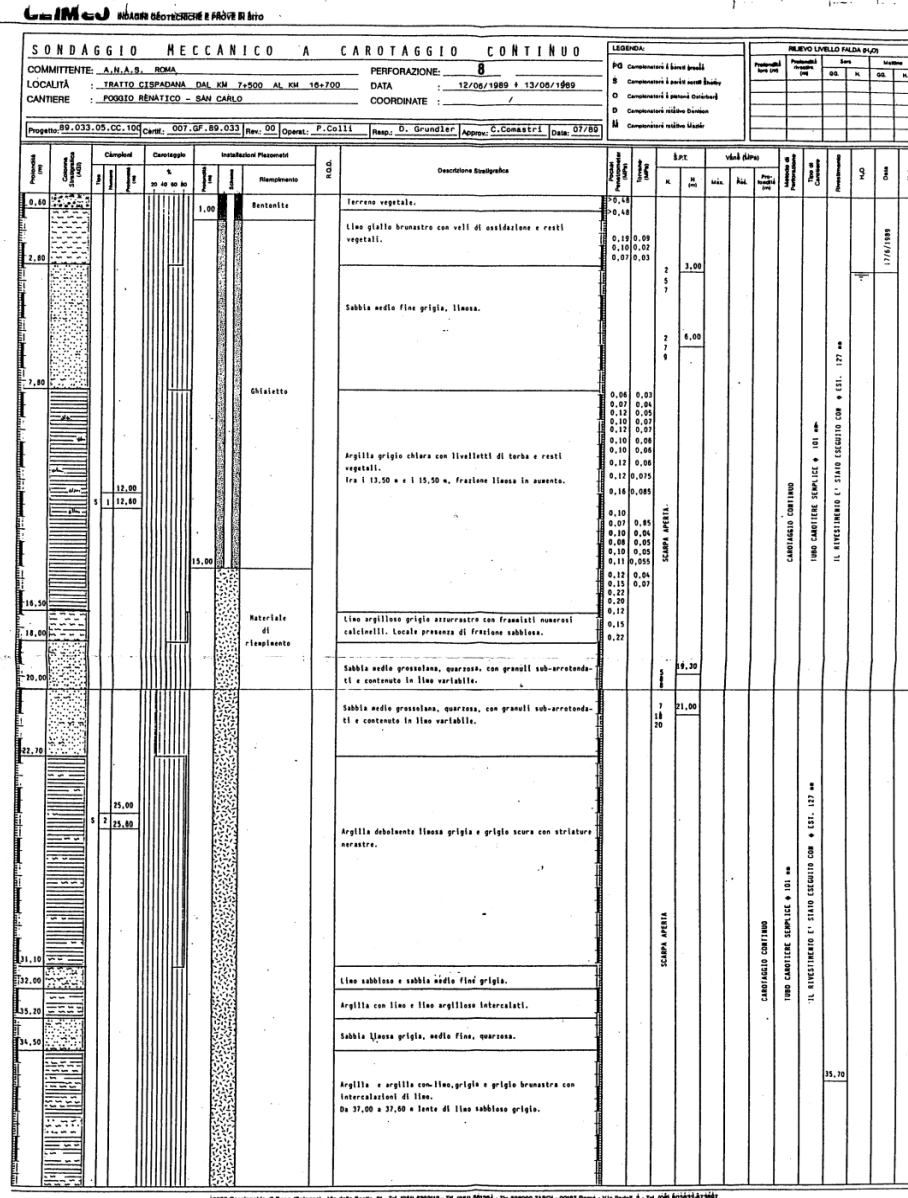


Figura 9- Stratigrafia del sondaggio 185130P432 (San Carlo)

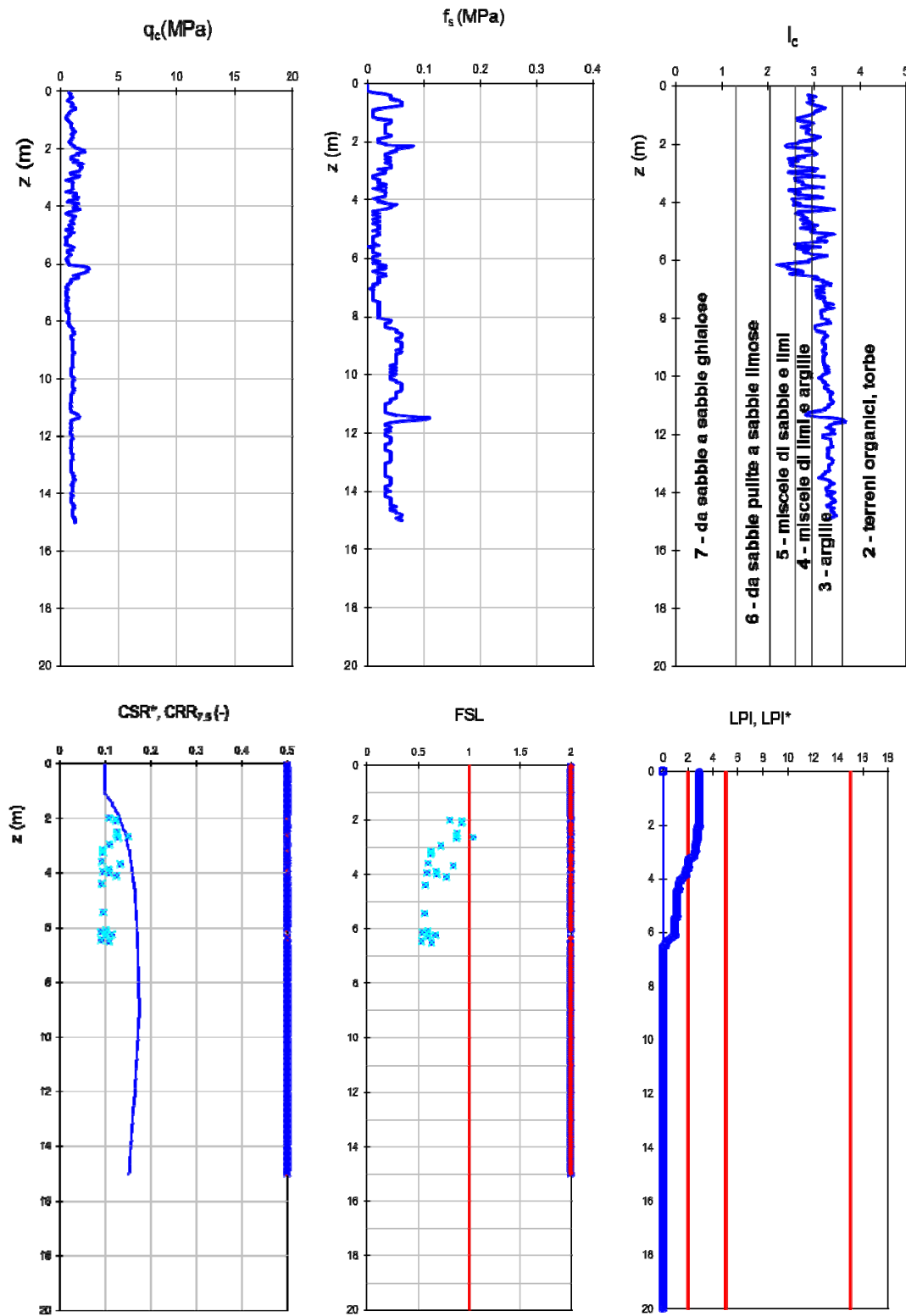


Figura 10 - Analisi della pericolosità sismica di liquefazione condotta sulla prova 185130E427 secondo il metodo di Robertson e Wride, 1998 (q_c = resistenza alla punta; f_s = resistenza laterale; I_c = indice di categoria del terreno; CSR = domanda sismica; CRR = resistenza a liquefazione; FSL = fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione; LPI = indice del potenziale di liquefazione)

6. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SUGLI EFFETTI OSSERVATI E IPOTESI DI LAVORO

Con riferimento ai numerosi sopralluoghi effettuati a Mirabello è possibile trarre alcune importanti considerazioni sulle cause che hanno probabilmente determinato i fenomeni di liquefazione osservati e, laddove tali effetti non si sono manifestati in campo libero, sugli effetti riscontrati sugli edifici e sul loro sistema di fondazioni. Molte di tali considerazioni, per analogia, possono essere estese anche al centro abitato di San Carlo.

La strada principale di Mirabello (Corso Italia) è orientata in direzione SW – NE (Figura 11), e ripercorre il vecchio alveo del Fiume Reno, prima che questo venisse deviato in seguito alle bonifiche di cui si è detto nel paragrafo 3. Le case si trovano quindi su un modesto pendio con il fronte su Corso Italia (punto più basso) ed il retro, in generale con cortili di varia dimensione, leggermente più in alto. Una seconda strada si estende sulla sommità arginale (antica): lungo la sponda destra (via argine vecchio) e lungo la sponda sinistra (argine postale). Su entrambi i lati l'argine è ancora ben visibile, specie dal lato campagna e presenta una discontinuità topografica evidente.

Il comportamento degli edifici e del terreno riscontrato a seguito dei sopralluoghi non è stato simmetrico sulle due sponde.

La sponda destra ha dato luogo a fenomeni di liquefazione senza fuoriuscita di materiale, anche in presenza di pozzi, ma che, con ogni probabilità, hanno determinato deformazioni laterali significative sul fianco dell'argine rivolto verso il paleoalveo (*lateral spreading*), come sembrerebbe confermato da alcuni indizi riscontrati in loco, quali le deformazioni e le fessurazioni rilevate sul lato destro del Corso Italia e soprattutto le roto-traslazioni delle fondazioni di alcuni edifici che si trovano su questo lato. Entrando nel dettaglio, dalle misure effettuate in un pozzo sito su questo lato (n.c. 431, Figura 11), è risultato che il livello attuale dell'acqua è all'incirca uguale a quello precedente al terremoto, ed è situato a -2.50 m dal piano del piazzale posteriore. I sedimenti sabbiosi sono risaliti almeno di 1.50 - 2.00 m (a detta degli abitanti anche di più), ma non sono usciti dai pozzi. È stato prelevato un campione del materiale sabbioso che ha riempito il pozzo, che è risultato sabbia fine, di colore marrone, così come marroni sono le tracce lasciate dall'acqua sul tubo di aspirazione del pozzo. L'abitazione prospiciente ha un fuori piombo di 30 mm in 4 m, verso "monte", varie porte che ora si richiudono da sole, e qualche lesione sulle pareti, ed altre in corrispondenza del pavimento che testimoniano uno "sprofondamento" dei muri perimetrali ed interni, con pendenze (misurate) di 3 mm in 1.50 m. Sul lato dell'edificio adiacente il Corso Italia, il marciapiede della casa ha "cozzato" con il collettore fognario, producendo una risalita delle lastre di pavimentazione del marciapiede, sul cordolo dello stesso (come meglio mostrato in alcune delle foto di seguito riportate). Si ha l'impressione che il flusso provocato dalla liquefazione delle sabbie abbia fatto scivolare le case che hanno rototraslato verso il Corso, con spostamento (non misurato) di qualche decina di millimetri verso il Corso, e rotazione oraria (di corpo rigido) verso monte.

L'argine sinistro, con geometria apparentemente simile ma forse con materiale differente, si è comportato in maniera diversa. Gli edifici, posti alla stessa altezza del n.c. 431, sono meno danneggiati, ma dai pozzi è uscita acqua e sabbia fine in abbondanza. In questo caso, la sabbia è invece risultata fine e finissima, apparentemente con poco/pochissimo limo, e grigia, come si può anche osservare dai numerosi vulcanelli formati su questo lato dell'argine e che si incontrano procedendo verso nord oltre la piazza principale, all'altezza dei giardinetti pubblici (Figura 11). Se invece si procede verso sud, sempre in zona argine sinistro, si incontra la zona industriale di Mirabello, ove, sulla sommità dell'argine, sono situati i capannoni industriali, alcuni dei quali crollati. Dall'analisi del danneggiamento, si nota una forte componente verticale rispetto a quella orizzontale (come confermato dalle registrazioni di Figura 3), con assenza assoluta di martellamento tra strutture vicine, nelle quali si è evidenziato il giunto di costruzione, che si è aperto di 50 100 mm, ma che è rimasto verticale, e senza slabbrature, né segni evidenti di martellamento. Inoltre, si osservano grandi spaccature nella pavimentazione dei piazzali (con rigetto anche di qualche centimetro) che proseguono all'interno dei capannoni (Figura 11), perfettamente allineate con il corso del paleoalveo del Reno (SW-NE) e dalle quali è uscita abbondante sabbia grigia, sebbene non in modo uniforme. Tali spaccature, proseguono verso Nord fino ad attraversare il campo sportivo, anch'esso sulla sommità dell'argine (Figura 11), per poi immergersi in corrispondenza di un edificio in muratura, nelle cui fondazioni originarie era stato realizzato un allargamento con blocchi di calcestruzzo ammorsati alla muratura, e che non ha avuto alcun danno. Lo stesso si è verificato per un edificio con struttura a "pilotis" ed un supermercato costruito su plinti.

Dal quadro di conoscenze disponibili e dai sopralluoghi effettuati emergono alcuni elementi di chiarezza, che possono essere così brevemente sintetizzati:

a) i fenomeni osservati sono stati l'effetto di una combinazione di circostanze che riguardano: l'azione sismica molto severa (un massimo storico per la zona) e una condizione del sottosuolo fortemente segnata da interventi antropici di bonifica e urbanizzazione, e dove molto probabilmente c'è stato anche un effetto stagionale che ha portato la falda ai suoi massimi livelli (dovuto a un lungo periodo di siccità seguito dalle abbondanti piogge degli ultimi due mesi);

c) le manifestazioni della liquefazione osservate nel corso dei vari sopralluoghi (specie subito dopo il terremoto, perché nei sopralluoghi successivi la sabbia è stata in gran parte rimossa) sono quelle tipiche descritte dai libri e manuali: vulcanelli, crateri, rigonfiamenti e rotture del terreno, cedimenti, sollevamenti, deformazioni laterali, ecc.

d) le evidenze di liquefazione sono risultate molto estese e appariscenti, soprattutto per quanto riguarda gli elevati volumi di terreno fuoriuscito, e hanno provocato con molta probabilità anche danni alle costruzioni dovuti a un movimento di corpo rigido del sistema struttura-fondazione; tuttavia non sono state riscontrate, nei siti visitati, manifestazioni indicative di fenomeni di fluidificazione con perdite di capacità portante del terreno al di sotto delle costruzioni (e conseguenti ribaltamenti degli edifici), né scorrimenti evidenti nelle scarpate degli argini; anche i cedimenti degli edifici appaiono

nel complesso limitati e per lo più uniformi al di sotto delle costruzioni; solo in qualche caso si sono registrati cedimenti più significativi accompagnati da rotazioni, comunque sempre contenute.

e) la disposizione lungo direttrici lineari NE-SW dei principali casi di liquefazione rilevati nei due centri abitati di San Carlo e Mirabello corrisponde esattamente ad uno sviluppo lineare di corpi sabbiosi, derivati dalla presenza del paleoalveo del Fiume Reno e da tutte le opere di bonifica e regolazioni idrauliche che si sono succedute nei secoli (riempimenti, argini, ecc.), lungo il quale si sono concentrate in un primo tempo attività agricole e più recentemente insediamenti abitativi, industriali e infrastrutture viarie;

f) la forma dei vulcanelli in campo libero e le abbondanti fuoriuscite di sabbia indicano che i livelli sabbioso-limosi sono - sia a San Carlo sia a Mirabello- molto superficiali e in alcuni casi affioranti. Tale ipotesi è congruente con quella che il sottosuolo sia costituito da argini e paleo alvei e in generale da riempimenti.;

g) il fatto che gli edifici delle zone di liquefazione presentino diverso grado di danneggiamento è da attribuire alle caratteristiche strutturali e fondali; ad esempio è stato osservato, a Mirabello, accanto a capannoni completamente distrutti e dove erano presenti importanti fuoriuscite di terreno, un supermercato costruito su plinti che invece ha tenuto benissimo; accanto al campo sportivo, dove c'erano evidenti casi di liquefazione, un edificio in muratura, nelle cui fondazioni originarie era stato realizzato un allargamento con blocchi di calcestruzzo ammorsati alla muratura, non ha avuto alcun danno.

h) il grado di danneggiamento strutturale degli edifici di civile abitazione, modesto se confrontato con i crolli che hanno caratterizzato molti edifici industriali, è da mettere in relazione alla diversa risposta all'azione sismica, a prevalente componente verticale e bassa frequenza, dei due sistemi costruttivi, caratterizzati da masse e rigidità diverse. Emblematico, circa l'influenza delle caratteristiche strutturali sul livello di danneggiamento, è il comportamento della chiesa di Mirabello, che a fronte di un campanile di altezza elevata, praticamente illeso, presenta il crollo di parte della facciata principale, di tutta la zona absidale e del tetto.

Naturalmente, per potere formulare delle ipotesi interpretative più fondate sulle dinamiche sismiche che hanno provocato i fenomeni osservati, occorreranno molti altri elementi di conoscenza, non soltanto di tipo sperimentale (prove in sito e in laboratorio), ma anche di natura analitica attraverso simulazioni con programmi di calcolo che eseguano l'analisi della probabilità di liquefazione in termini di tensioni efficaci e che quindi permettano di riprodurre l'andamento delle pressioni interstiziali durante l'azione sismica.

Tra le questioni aperte sotto il profilo scientifico è quella che riguarda la possibilità che la liquefazione sia stata anche legata a fenomeni amplificazione locale; ma sarebbe anche interessante approfondire il ruolo che ha avuto la massa d'acqua sollevatasi sotto la fondazione degli edifici perché non è da escludere che abbia avuto un effetto smorzante sulle onde di taglio trasmesse alla base delle sovrastanti costruzioni.

Tuttavia, ai fini di una programmazione delle indagini, occorre separare le questioni aperte sul piano scientifico dalle questioni di natura operativa che riguardano la collettività colpita dal terremoto.

Sul *piano scientifico*, un problema prioritario è la ricostruzione di un modello di sottosuolo, individuando le componenti naturali e le componenti di origine antropica, e la loro storia. Sotto l'aspetto più strettamente geotecnico il programma delle indagini deve comprendere sondaggi profondi (almeno 50 m), prelievo di campioni indisturbati negli strati dove ciò è possibile, ma anche di campioni non necessariamente indisturbati da ricostruire in laboratorio, prove CPT, prove down hole, ecc. Il programma delle indagini deve essere studiato in stretta relazione con il programma di ricerca.

Sul *piano operativo* occorre distinguere tre tempi. Nel breve periodo il problema prioritario è ricostruire le caratteristiche geometriche e strutturali degli edifici e le loro tecniche fondali rilevando attentamente il danno. Per quanto detto sopra sono state proprio queste diverse caratteristiche a marcare il diverso grado di danneggiamento. Nel medio periodo, in questi centri si dovrà procedere a redigere una carta di microzonazione che fornisca per le diverse zone un indice di pericolosità e soprattutto dia delle indicazioni sulle misure di riduzione del rischio per le strutture esistenti e per quelle nuove (tenendo presente che quest'evento sismico è stato un massimo storico).

Nel lungo periodo, infine, prendendo atto delle risultanze degli studi di microzonazione, si tratterà di valutare l'opportunità o meno di adottare delle misure per ridurre il rischio di liquefazione a vasta scala nelle aree interessate con interventi specifici per le varie zone.

Riferimenti bibliografici

Baratta, M. (1901). *I terremoti d'Italia. Saggio di storia, Geografia e bibliografia sismica italiana con 136 sismocartogrammi*. Arnaldo Forni Editore.

Cazzola F. (1997). *La ricchezza della terra. L'agricoltura emiliana fra tradizione e innovazione*. In: *Storia di Italia dall'unità ad oggi. Le Regioni. L'Emilia-Romagna*. Giulio Einaudi Editore

Galli P., Meloni F. (1993) - *Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia*. *Il Quaternario*, 6 (2), pp. 271-292.

Robertson P.K., and Wride C.E. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 35(3), 442-459

7. IMMAGINI DELLE MANIFESTAZIONI OSSERVATE

Nelle Figure 11 e 12 sono riportate le mappe delle evidenze di liquefazione riscontrate rispettivamente a Mirabello e San Carlo, seguite da una serie di foto di dettaglio completate da un breve commento nella didascalia.

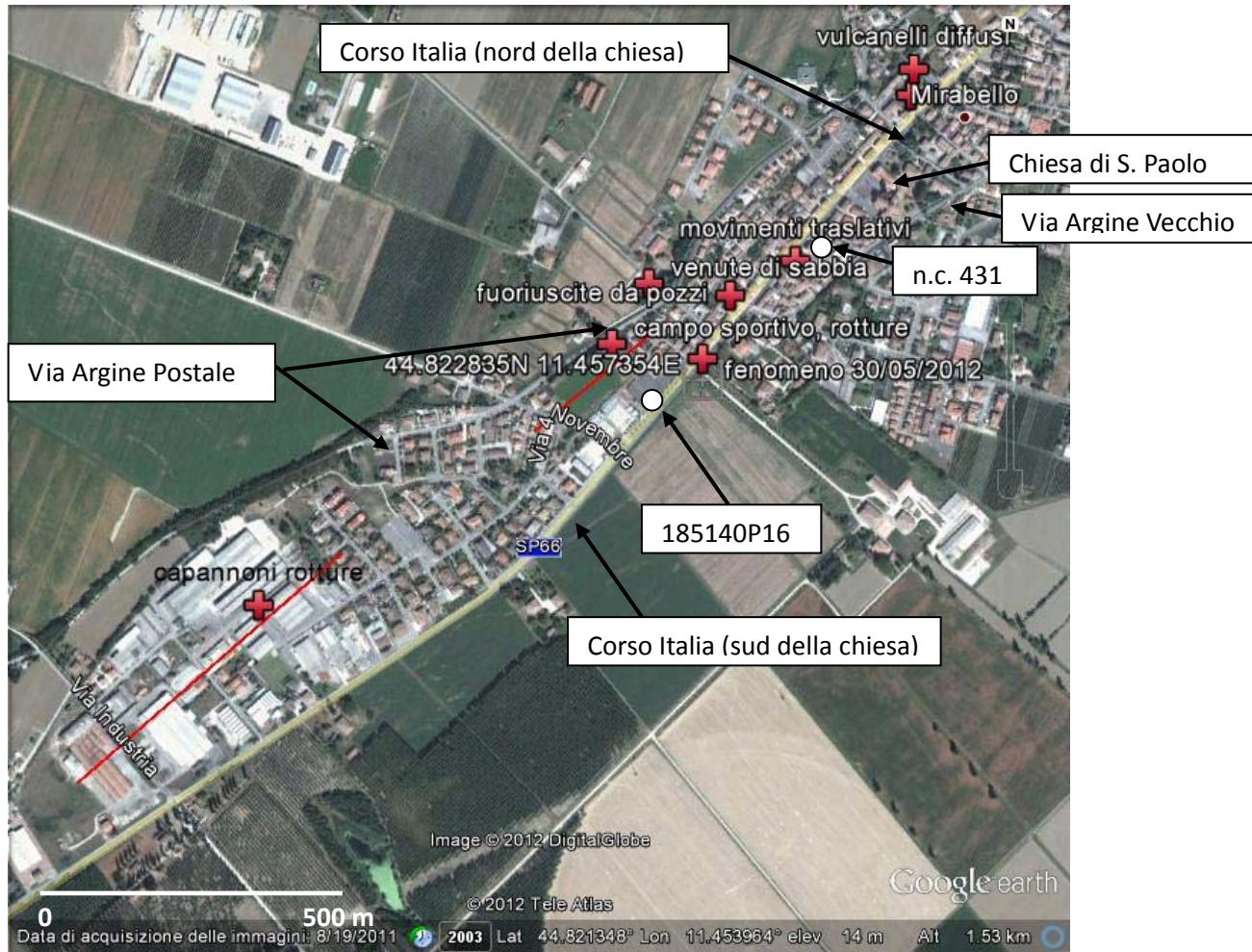


Figura 11 - Ubicazione degli effetti osservati a Mirabello



Foto 11.a. – Spaccatura con fuoriuscita di sabbia nel piazzale antistante la serie di capannoni indicata in figura 11, in prossimità del mobilificio Martinelli nella zona industriale di Mirabello (zona sud di Corso Italia, argine sinistro)



Foto 11.b. – Proseguimento della spaccatura con fuoriuscita di sabbia all'interno dei capannoni adiacenti il mobilificio Martinelli nella zona industriale di Mirabello (Via del Lavoro)



Foto 11.c – Rifluimento di sabbia nei campi sottostanti il lato campagna dell'argine sinistro (via argine postale) nella zona industriale di Mirabello



Foto 11.d – Proseguimento della spaccatura nel campo sportivo di Mirabello (dietro il cimitero)



Foto 11.e. – *Vulcanelli nel campo sportivo di Mirabello (dietro il cimitero)*



Foto 11.f. – *Proseguimento della spaccatura verso il centro abitato di Mirabello, alla sommità dell'argine sinistro (via argine postale)*



Foto 11.g – *Abbondante rifluimento di sabbia nei campi sottostanti il lato campagna dell'argine sinistro (via argine postale) nella zona del campo sportivo di Mirabello*



Foto 11.h – *Abbondante fuoriuscita di sabbia da un pozzo di giardino interno, nel centro abitato di Mirabello (Corso Italia, sud della Chiesa, lato sinistro).*



Foto 11.i. – Vulcanelli diffusi nei giardinetti di Corso Italia (nord della chiesa) lato sinistro adiacenti via Cavour.



Foto 11.j. – Sollevamento della pavimentazione del marciapiede di Corso Italia (sud della Chiesa) lato destro in prossimità del civico 431

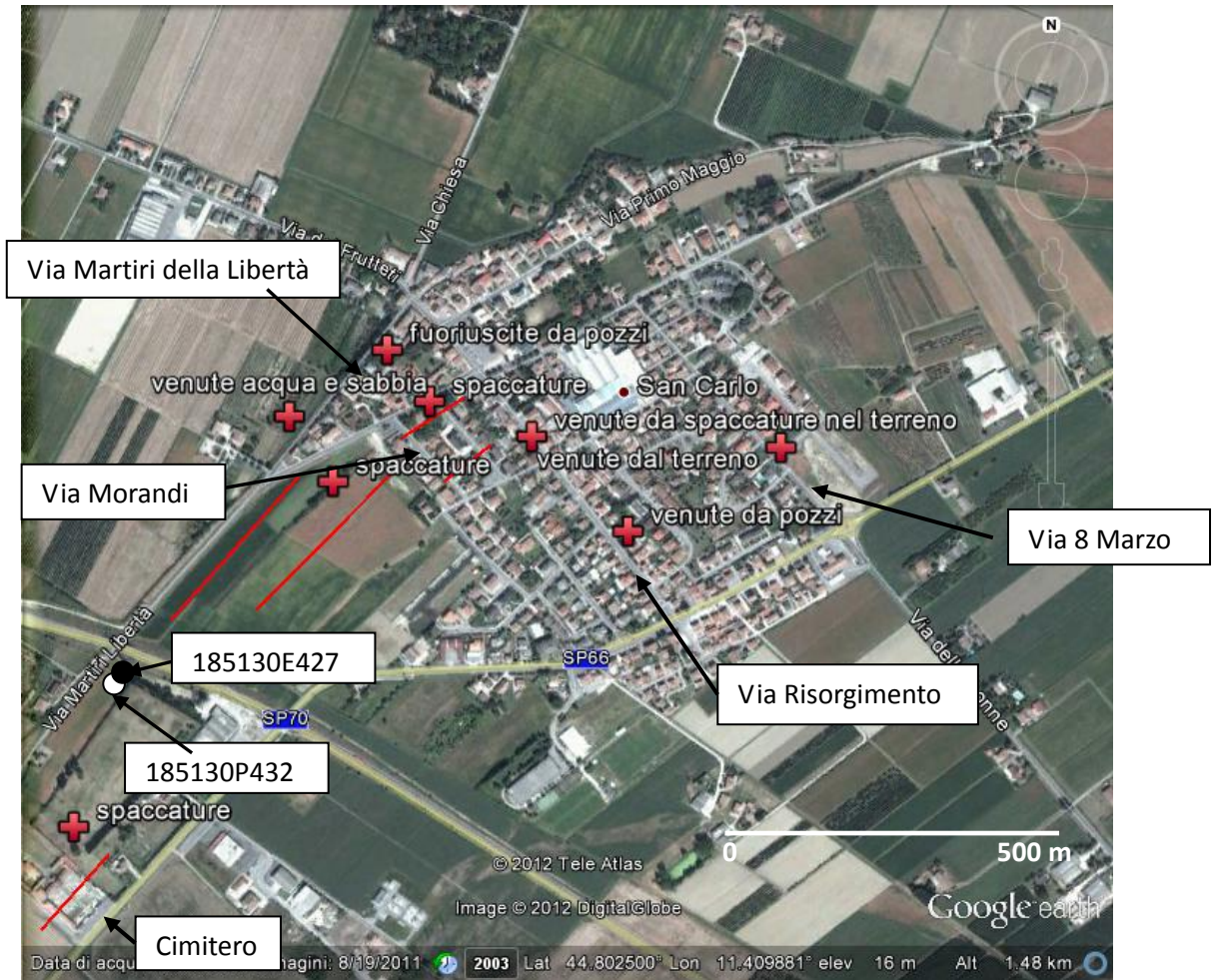


Figura 12 - Ubicazione degli effetti rilevati a San Carlo



Foto 12.a - Rigonfiamento della pavimentazione e fuoriuscita di sabbia al n.c. 22 di Via Risorgimento, San Carlo



Foto 12.b – Cumuli di sabbia raccolti nel piazzale al n.c. 22 di Via Risorgimento, San Carlo



Foto 12.c – Particolare del rigonfiamento della pavimentazione al n.c. 22 di Via Risorgimento, San Carlo



Foto 12d – *Particolare della fuoriuscita di sabbia al n.c. 22 di Via Risorgimento, San Carlo*



Foto 12e – Edificio in muratura lesionato e fuoriuscita di sabbia in Via Risorgimento, San Carlo



Foto 12f - Rifiuimento di sabbia nel seminterrato del n.c. 45 di Via Risorgimento.



Foto 12g - *Rifluimento di sabbia nel giardino di un'abitazione in Via Martiri della Libertà a San Carlo.*



Foto 12h - *Rifluimento di sabbia in un campo sito sul lato campagna di Via Martiri della Libertà a San Carlo.*



Foto 12i - Spaccature e cedimenti laterali dovuti a liquefazione lungo Viale Gramsci, a San Carlo.



Foto 12j - Serie di grosse spaccature nel terreno con rigetto di circa 40 cm (linee rosse di Figura 12).



Foto 12k - Grossa spaccatura nel giardino di un'abitazione di Via Morandi a San Carlo proseguimento della serie di spaccature della foto 12.j.



Foto 12l - Cedimento di fondazione di un edificio di Via Morandi a San Carlo proseguimento della serie di spaccature.



Foto 12l - *Grossa serie di spaccature nei giardinetti adiacenti via Rossini, a San Carlo, proseguimento della serie di spaccature della foto 12.j.*



Foto 12m - *Intenso rifluimento di sabbia in un garage di Via Morandi a San Carlo.*



Foto 12n – Vulcanelli diffusi in un giardino di un'abitazione in via VIII Marzo, a San Carlo.



Foto 12o – Spaccatura nel terreno e rifluimento di sabbia nel cimitero di San Carlo , proseguimento delle spaccature della foto 12j e riportate in Figura 12.