



Regione Toscana



Rischio Sismico



100
MUGELLO

Centenario sisma del 29 giugno 1919

CONVEGNO

La prevenzione del rischio sismico e
gli studi di pericolosità sismica del Mugello



**Studi del potenziale di liquefazione
dei terreni nell'area del Mugello**



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

Claudia Madiati

✉ clau@dicea.unifi.it

Firenze, 23 Settembre 2019

Sommario

1. Introduzione
2. Metodi semplificati di stima della pericolosità di liquefazione
3. Lo studio nell'area del Mugello
4. Criticità nell'uso di metodi semplificati
5. Conclusioni

CHE COSA È LA LIQUEFAZIONE

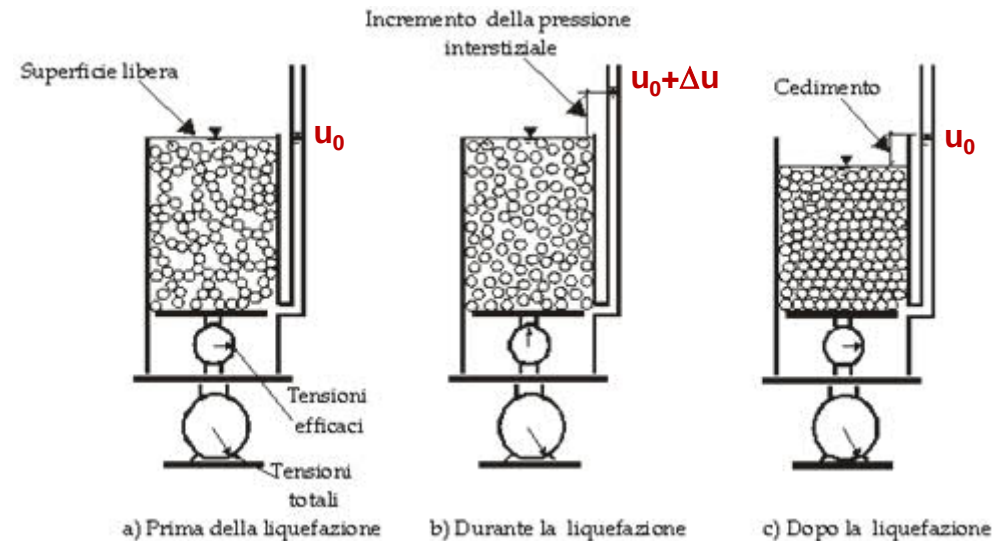
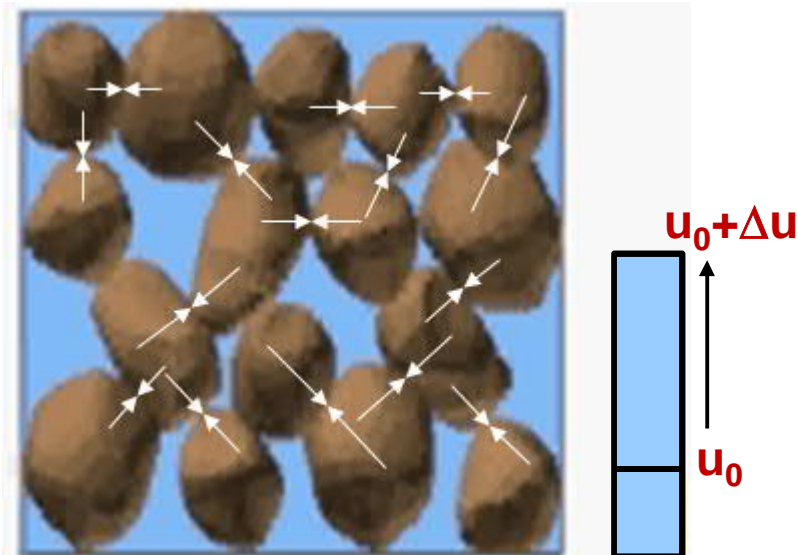
Stato fisico in cui può venire a trovarsi un terreno incoerente ($c' = 0$) saturo per la perdita di resistenza al taglio (τ) dovuta all'incremento delle pressioni interstiziali (u)

Principio delle pressioni efficaci $\sigma' = \sigma - u$

Criterio di rottura di Mohr Coulomb $\tau = \sigma' + \sigma' \tan \varphi'$

$u \uparrow$
 $\sigma' \downarrow$
 $\tau \downarrow$

per $\tau = 0$ il terreno assume la consistenza di un fluido viscoso



FENOMENI INCLUSI NEL TERMINE LIQUEFAZIONE

Fluidificazione

Condizioni: resistenza al taglio (durante o dopo lo scuotimento) **inferiore** agli sforzi di taglio necessari per l'equilibrio

Manifestazioni: grandi deformazioni permanenti, collassi di fondazioni e opere di sostegno, frane

Danneggiamenti: gravissimi

Mobilità ciclica

Condizioni: resistenza al taglio (durante o dopo lo scuotimento) **superiore** agli sforzi di taglio necessari per l'equilibrio

Manifestazioni: deformazioni permanenti limitate, spostamenti laterali, cedimenti assoluti e differenziali, smottamenti

Danneggiamenti: da modesti a gravi a strutture, infrastrutture e sotto-servizi

Liquefazione ciclica

Condizioni: assenza di sforzi di taglio necessari per l'equilibrio statico (superfici piane e orizzontali, assenza di carichi in superficie)

Manifestazioni: fuoriuscite di acqua e sabbia, crateri e vulcanelli, fratture, ondulazioni e cedimenti del piano campagna

Danneggiamenti: assenti (vulnerabilità ed esposizione nulle o trascurabili)



COLLASSI DI FONDAZIONI E FRANE (FLUIDIFICAZIONE)



Caracas, 1967- M=6.5



Alaska, 1964 - M=9.2

SPOSTAMENTI LATERALI (MOBILITÀ CICLICA)



Loma Prieta, California, 1989 - M=7.1

Kocaeli, Turchia, 1999 - M=7.6



FUORIUSCITE DI ACQUA E SABBIA (LIQUEFAZIONE CICLICA)

Emilia Romagna, 2012 - M=6.1



(by courtesy of V. Fioravante)



(<http://www.geerassociation.org>)

Christchurch, Nuova Zelanda, 2011 - M=6.2

CRATERI E VULCANELLI (LIQUEFAZIONE CICLICA)



Emilia Romagna, 2012 - $M=6.1$

Loma Prieta, California, 1989 - $M=7.1$



QUANDO E DOVE PUÒ VERIFICARSI LA LIQUEFAZIONE

È molto probabile che la liquefazione avvenga quando sono verificate simultaneamente le seguenti condizioni:

Condizioni del terreno
(fattori predisponenti,
influiscono sulla resistenza
al taglio iniziale)

- Profondità dello strato < 15÷20 m da 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 ($\phi < 0.005 \text{ mm}$) < 15%

Si riscontrano spesso in prossimità di mari, fiumi, laghi, spiagge, depositi sedimentari recenti con falda superficiale

Condizioni sismiche
(fattori scatenanti,
influiscono sull'incremento
delle pressioni interstiziali)

- Magnitudo > 5.5
- PGA > 0.15 g
- durata > 15-20 sec

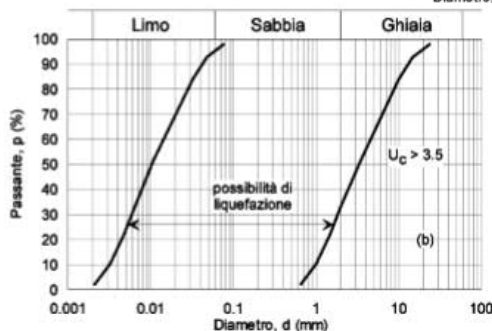
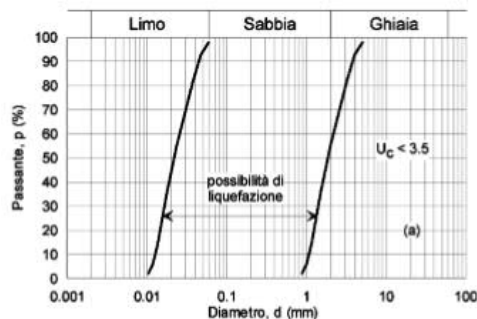
QUANDO E DOVE PUÒ VERIFICARSI LA LIQUEFAZIONE

Si può escludere la verifica a liquefazione se si riscontra almeno una delle seguenti condizioni (NTC 2018)

Condizioni sismiche

- Accelerazioni massime al p.c. in condizioni free-field minori di 0,1 g

Condizioni del terreno



- Profondità media stagionale della falda $z_w > 15\text{m}$ da p.c. (per p.c. sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali)
- Sabbie pulite caratterizzate da $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ ($(N_1)_{60}$ e q_{c1N} : valori normalizzati del numero di colpi da SPT e della resistenza di punta da CPT)
- Granulometria esterna a determinate fasce critiche

STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE

La Pericolosità di liquefazione può essere valutata ricorrendo a tre categorie di metodi, in ordine di risorse impegnate crescenti:

Metodi empirici (qualitativi)

- Es:
- criterio storico
 - criterio geologico
 - criterio di composizione

Metodi semplificati
(ingegneristici, quantitativi)

Metodi dinamici (avanzati)

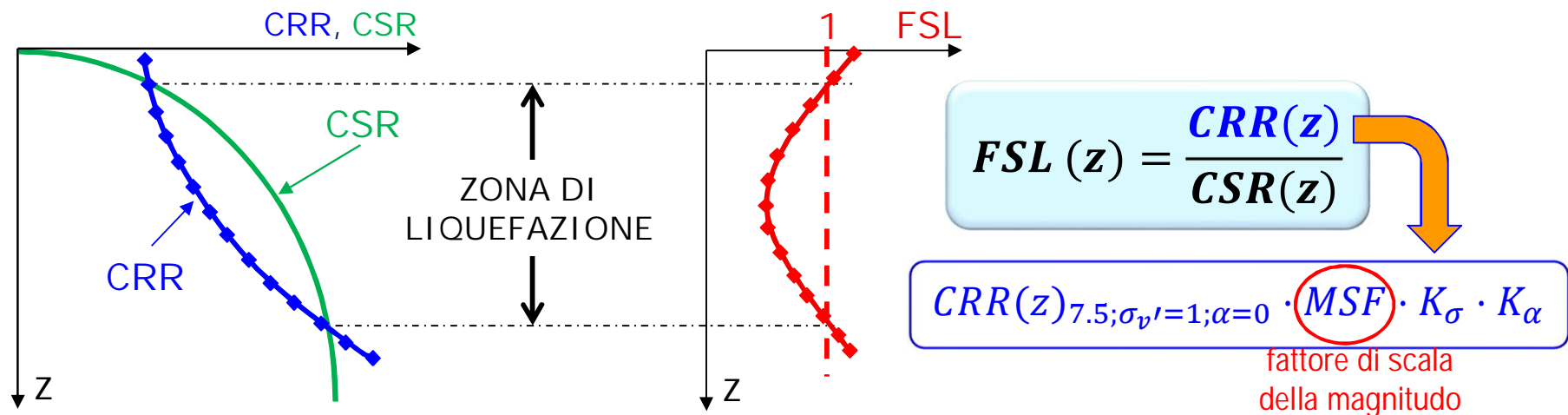
- Es:
- Differenze Finite
 - Elementi Finiti

La scelta del metodo dipende dalle finalità dell'indagine (microzonazione o progettazione) e dal livello di dettaglio richiesto

METODI SEMPLIFICATI DI STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE

- analisi monodimensionali
- condizioni free field (liquefazione ciclica)

Calcolo del fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione (FSL) al variare della profondità (z):

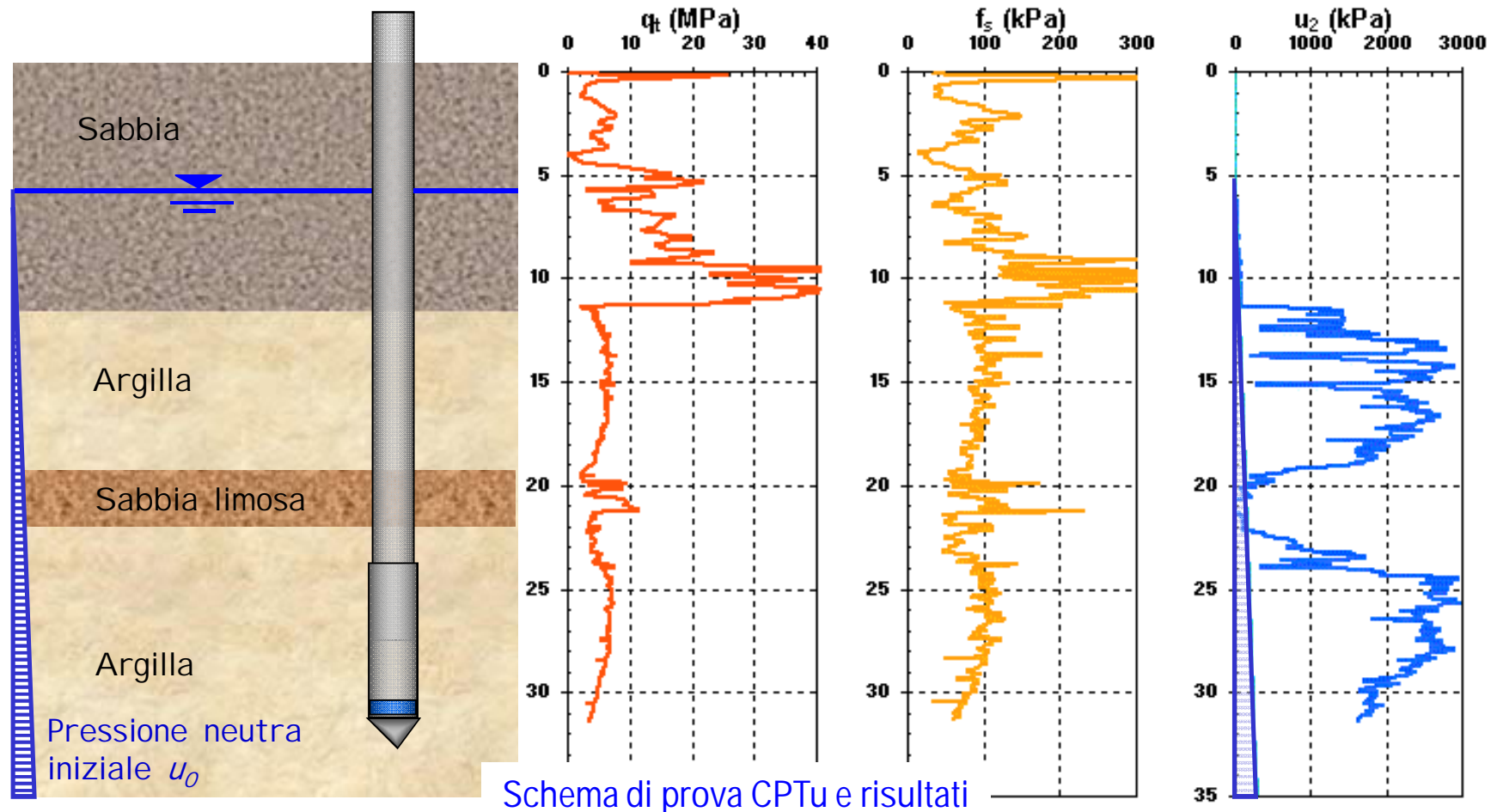


$CRR(z)$ = resistenza normalizzata del terreno alla liquefazione a profondità z
(da prove in sito, es. CPT, SPT, misure di V_s , o di laboratorio)

$CSR(z)$ = sforzo di taglio normalizzato indotto dal terremoto a profondità z
(da relazioni empiriche o analisi di Risposta Sismica Locale)

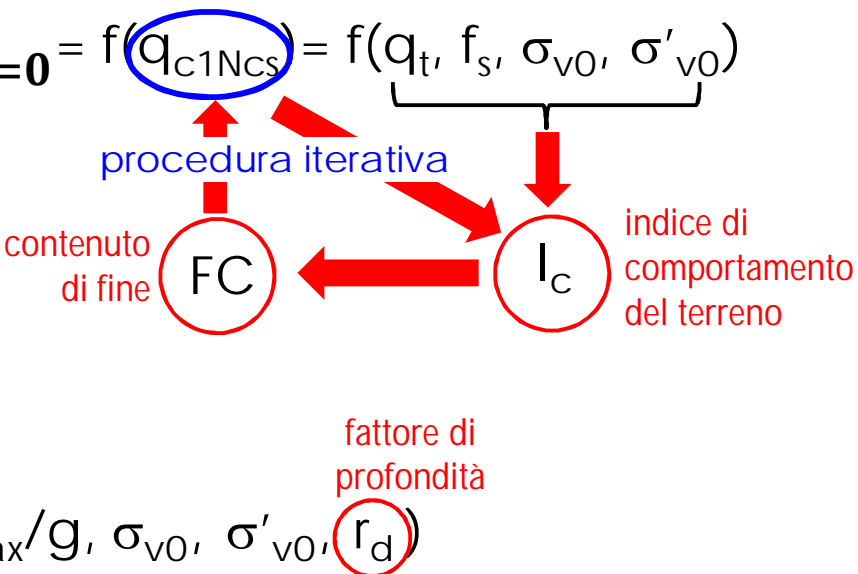
METODI SEMPLIFICATI DI STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE

I metodi basati sull'impiego di prove CPT sono preferibili per la migliore ripetibilità delle misure e per la continuità dei profili penetrometrici



METODI SEMPLIFICATI DI STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE

Nei metodi semplificati che utilizzano prove CPT:

$$\text{CRR}(z)_{7.5; \sigma_{v'}=1; \alpha=0} = f(q_{c1Ncs}) = f(q_t, f_s, \sigma_{v0}, \sigma'_{v0})$$


procedura iterativa

contenuto di fine FC

indice di comportamento del terreno I_c

fattore di profondità r_d

$$\text{CSR}(z) = f(M, a_{\max}/g, \sigma_{v0}, \sigma'_{v0}, r_d)$$

il calcolo di FSL è limitato agli strati potenzialmente liquefacibili per motivi di natura

- fisica: $z < z_{\text{crit}}, z > z_w$
- litologica: $I_c < I_{c, \text{lim}}$
- meccanica: $q_{c1Ncs} < q_{c1Ncs, \text{lim}}$

METODI SEMPLIFICATI DI STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DI LIQUEFAZIONE

La pericolosità di liquefazione sulla verticale di indagine si stima calcolando l'indice del potenziale di liquefazione

($0 \leq LPI \leq 100$) quantifica i possibili effetti tenendo conto di:
fattore di sicurezza, profondità e spessore degli strati liquefacibili

$$LPI = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot W(z) \cdot dz$$

$$F(z) = \begin{cases} 0 & \text{per } FSL \geq 1.2 \\ 2 \cdot 10^6 \cdot \exp(-18.427 \cdot FSL(z)) & \text{per } 0.95 < FSL < 1.2 \\ 1 - FSL(z) & \text{per } FSL \leq 0.95 \end{cases}$$

$$w(z) = \frac{200}{z_{crit}} \cdot \left(1 - \frac{z}{z_{crit}}\right)$$

Sonmez, 2003 (per $z_{crit}=20m$)

LPI	Pericolosità
0	Nulla
$0 < LPI \leq 2$	Bassa
$2 < LPI \leq 5$	moderata
$5 < LPI \leq 15$	alta
$LPI > 15$	molto alta

- di norma (non necessariamente) $z_{crit}=20m$

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO



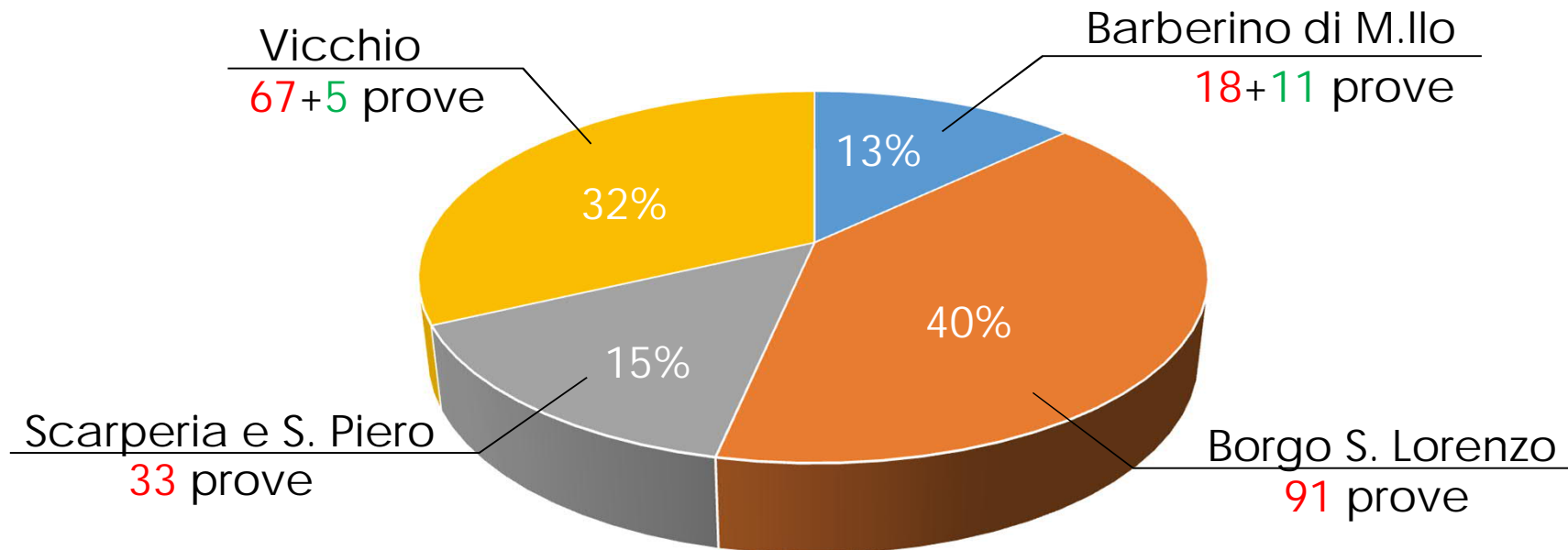
Gruppo di Lavoro:

Claudia Madaia
Johann Facciorusso
Elisa Gargini
Giovanni Vannucchi

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Lo studio ha riguardato 4 Comuni : Barberino
Borgo San Lorenzo
Scarperia e San Piero
Vicchio

per un totale di 225 siti per i quali si disponeva di prove CPT (**meccaniche** o **elettriche**) di lunghezza $\geq 8\text{m}$ e informazioni sulla profondità della falda



STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Esistono nell'area le condizioni per cui si può verificare la liquefazione?

- | | | |
|--|------|--------|
| ➤ Evidenze storiche di liquefazione | ☑ SI | |
| ➤ Morfologia (terrazzi e letto fluviale) | ☑ SI | |
| ➤ Età (recenti o attuali) | ☑ SI | |
| ➤ Litologia (miscele di sabbie e limi) | ☑ SI | |
| ➤ Granulometria | | ☑ n.d. |
| ➤ Contenuto di fine, plasticità | | ☑ n.d. |
| ➤ Profondità degli strati sabbioso-limosi ($6\text{m} < z < 15\text{m}$) | ☑ SI | |
| ➤ Posizione della falda (superficiale) | ☑ SI | |
| ➤ Terremoto atteso per periodo di ritorno $T_R=475$ anni
($M_w = 6.5$, $0.274\text{g} < a_{\text{max}} < 0.284\text{g}$) | ☑ SI | |



L'area può essere soggetta a liquefazione

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

TESTIMONIANZE DI EVIDENZE DI LIQUEFAZIONE DURANTE EVENTI SISMICI PASSATI

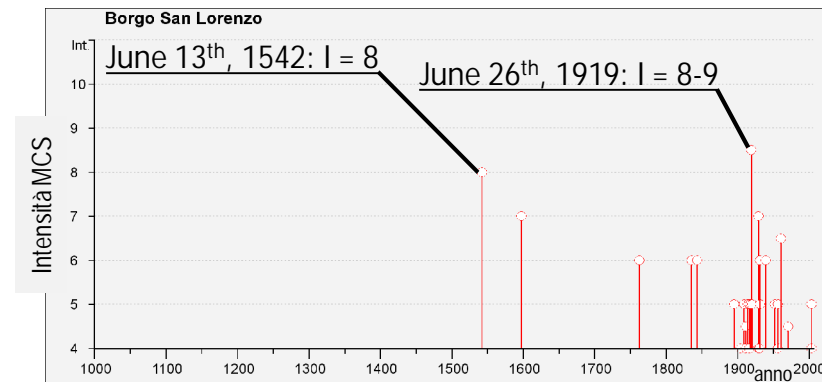
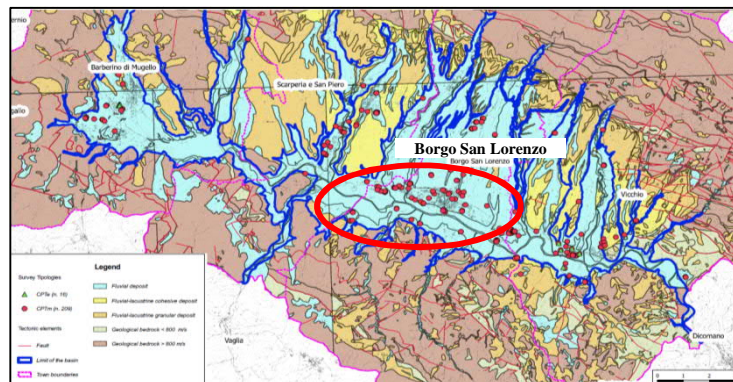
13 Giugno 1542: "A Borgo San Lorenzo, immediatamente dopo il terremoto, scaturirono acque sulfuree che formarono un piccolo lago prosciugatosi in pochi giorni."

Da "Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980"

Istituto Nazionale di Geofisica, SGA storia geofisica ambiente. Luglio 1995

26 Giugno 1919: "Dovunque la scossa fu sussultoria ed ondulatoria [...] in molte parti fu notata l'esplosione di polle d'acqua che hanno allagato i campi vicini. Altre polle scoppiarono ma si constatò che era eruzione di lava. [...]."

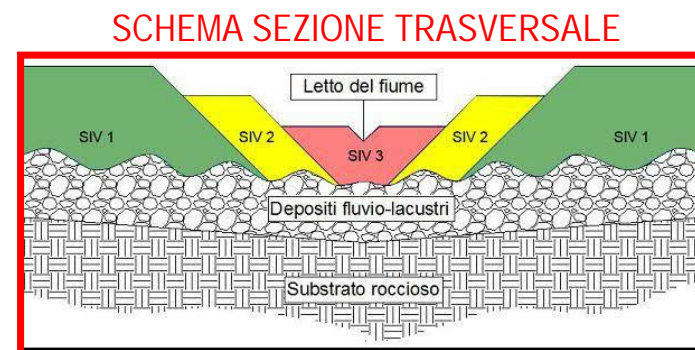
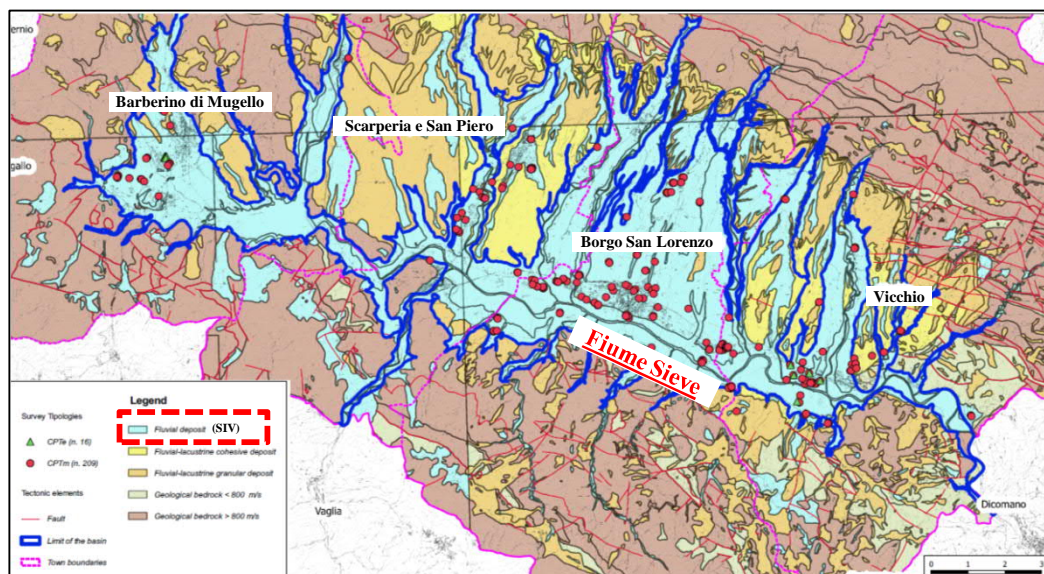
Da "MUGELLO 29 GIUGNO 1919, Sui luoghi del terremoto" a cura di S. Castenetto e M. Sebastiano, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile. Dicembre 2004.



CRITERIO STORICO: la liquefazione tende a ripetersi dove si è già verificata

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

MORFOLOGIA ED ETÀ GEOLOGICA

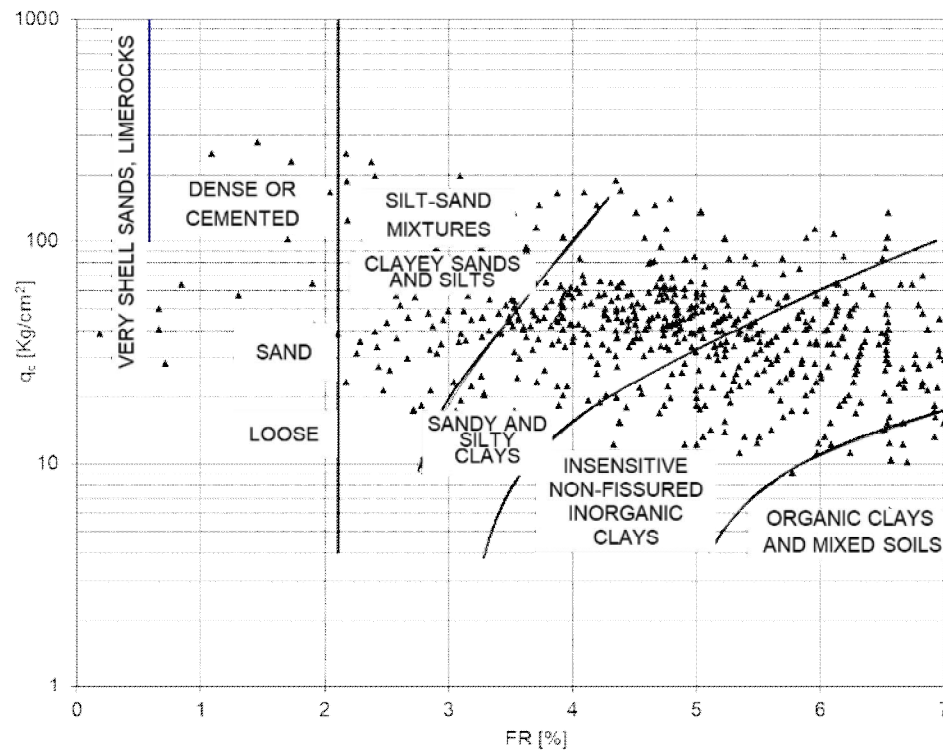


CRITERIO GEOLOGICO

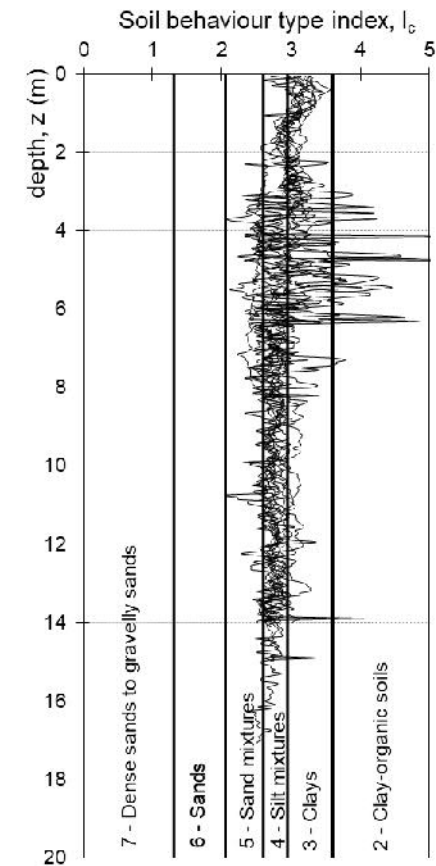
Morfologia	Liquefazione
Letti di fiume, antichi e recenti, paludi, terreni di bonifica, zone interdunari	Probabile
Conoidi, argini naturali, dune, pianure di esondazione, spiagge	Possibile
Terrazzi, colline, montagne	Improbabile

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

CLASSIFICAZIONE DEL TERRENO OTTENUTA DALLE 225 PROVE CPT



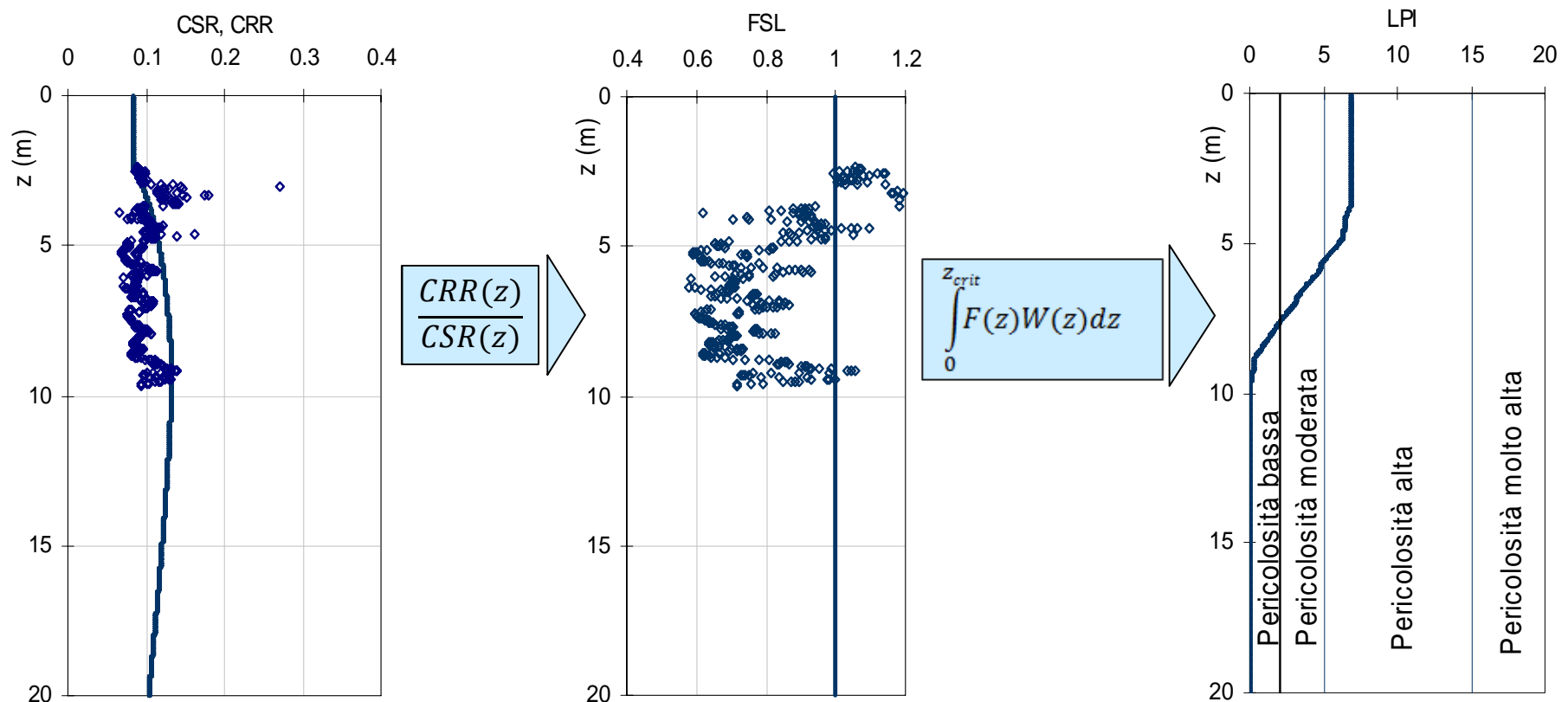
CRITERIO DI COMPOSIZIONE



STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Le analisi sono state eseguite con 3 differenti metodi basati sulle CPT

- ❖ Boulanger & Idriss (2014) – B&I
- ❖ Juang et al. (2006) – J&al
- ❖ Robertson (2009)



STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

1. Utilizzo di prove CPT meccaniche
2. Differenze nei risultati di metodi diversi
3. Determinazione indiretta del contenuto di fine FC
4. Valore di $I_{C,lim}$ per l'esclusione dal calcolo di FSL
5. Parametri indice per la liquefazione
6. Distribuzione areale di LPI

STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

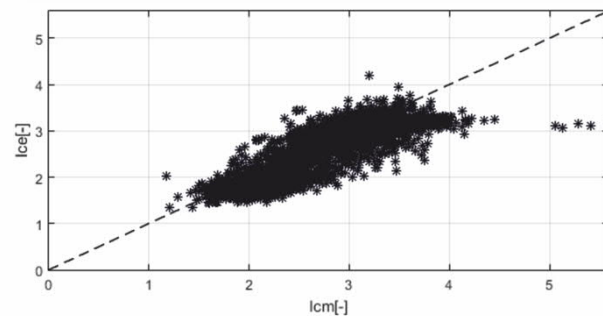
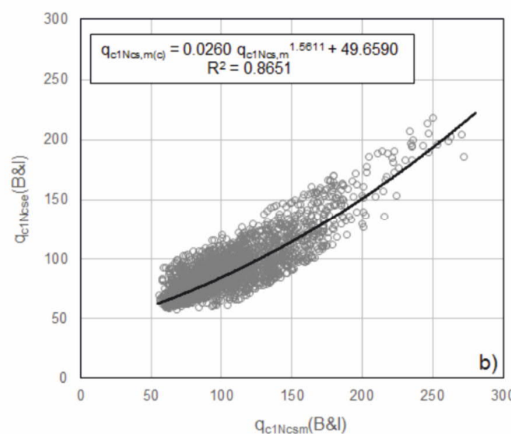
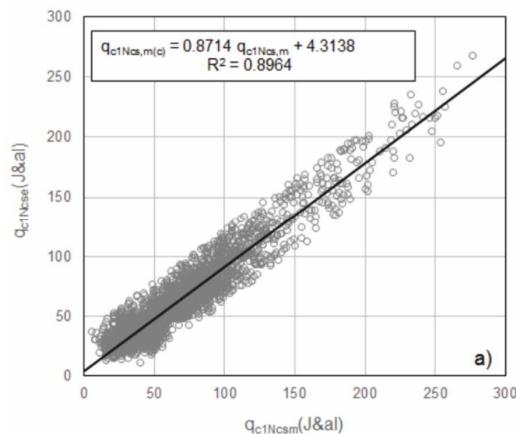
#1 Utilizzo di prove CPT meccaniche

Tenuto conto che:

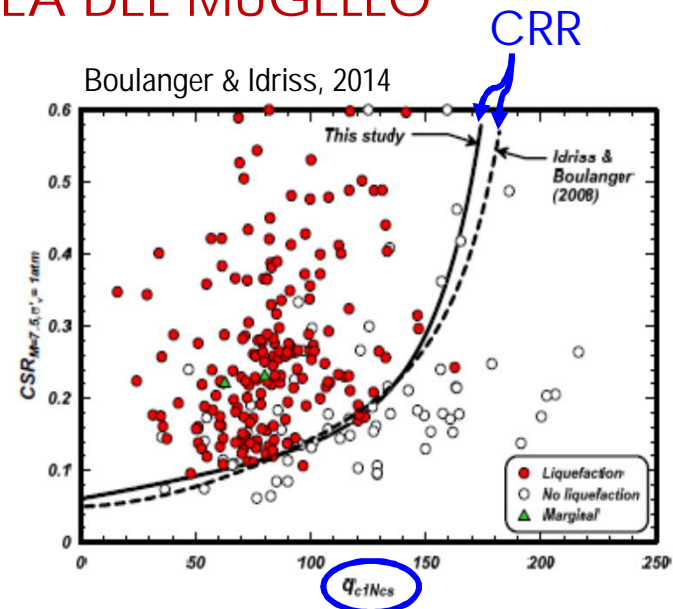
- tutti i metodi si basano su database relative a risultati di prove elettriche
- applicati a CPT meccaniche portano ad una sovrastima di CRR



Per utilizzare i risultati delle CPT meccaniche disponibili alcuni parametri sono stati corretti con opportune relazioni empiriche (metodi di B&I e J&aI)



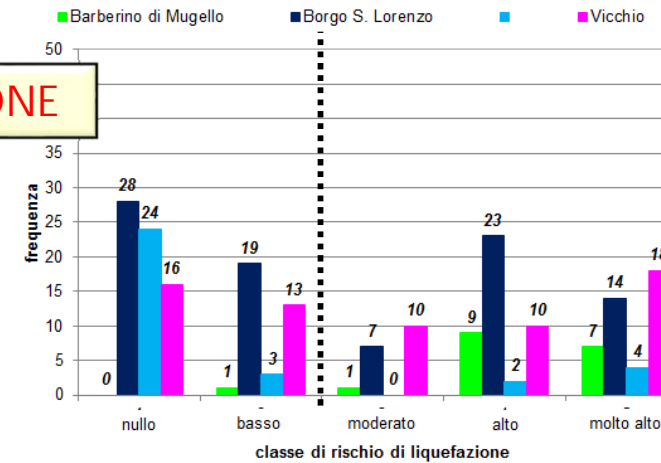
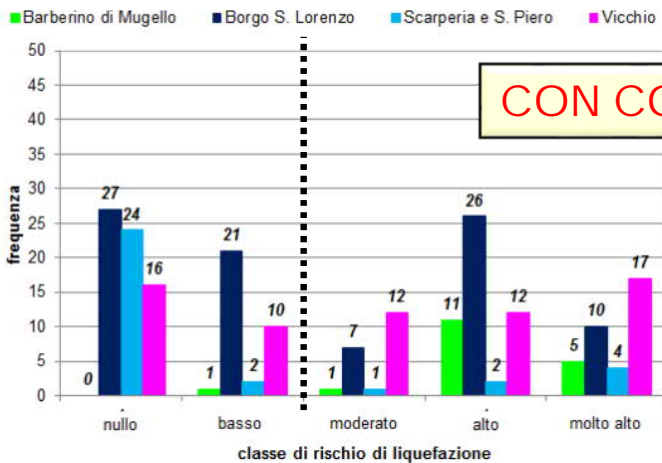
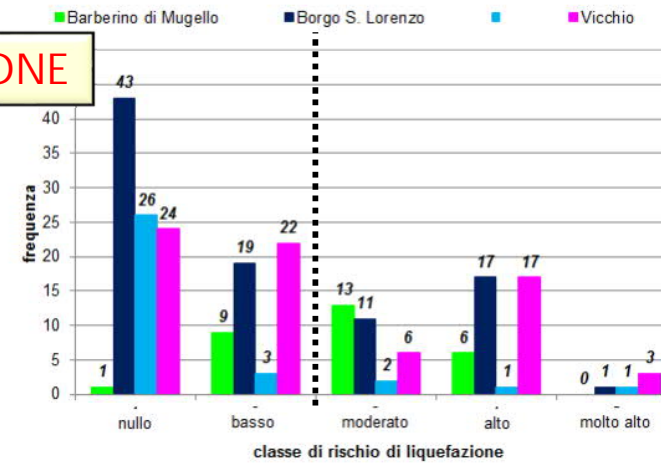
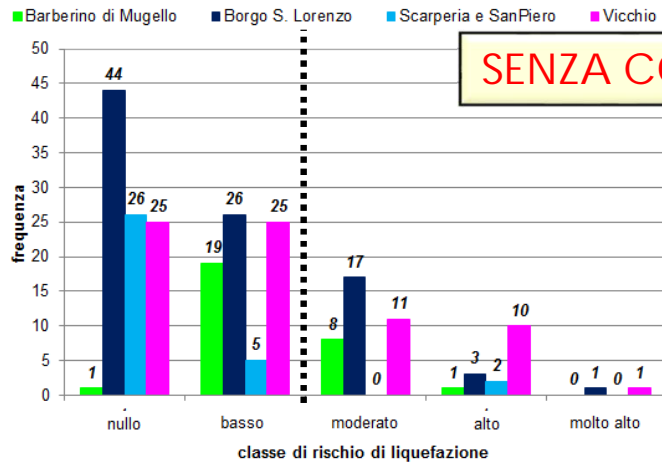
Facciorusso et al., 2017



STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Boulangier & Idriss (2014)

Juang et al. (2006)

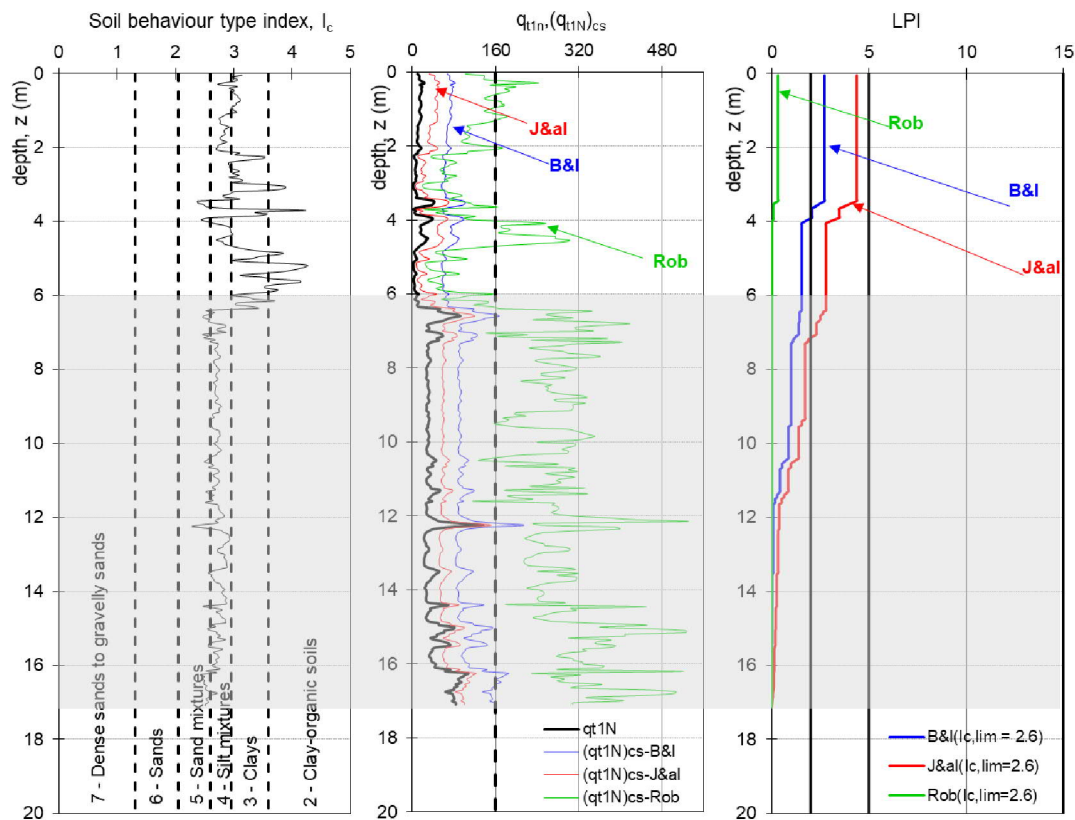


- passaggio significativo alle classi di rischio più alto
- (buon accordo tra i due metodi)

STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

#2 Differenze nei risultati di metodi diversi

I risultati di metodi diversi possono differire significativamente a causa di:



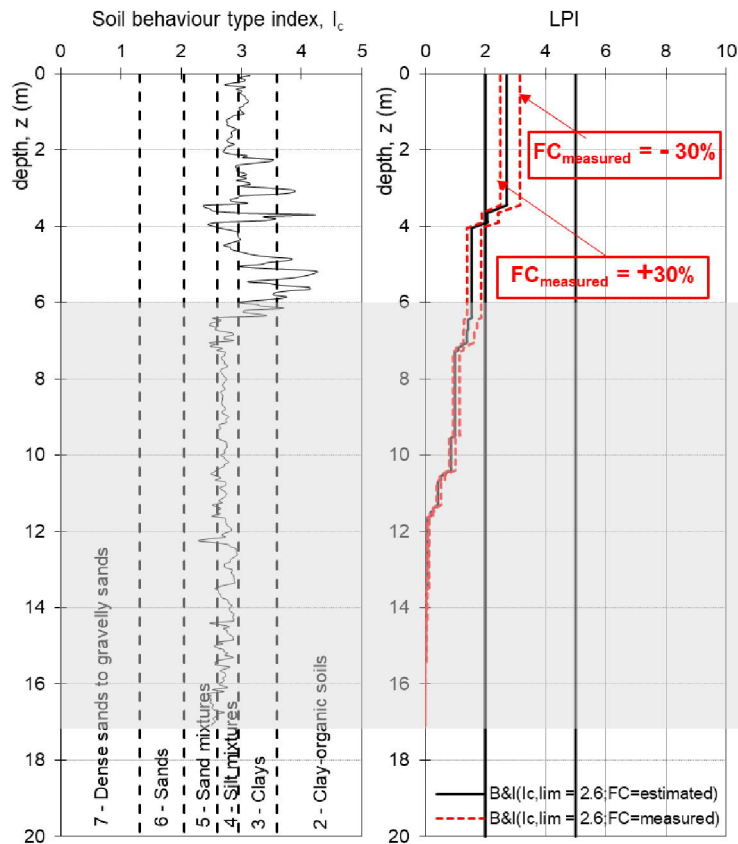
- database di riferimento diverso
- diversa forma delle curve
 $CRR = f(q_{c1Ncs})$
- correlazioni empiriche diverse per stimare q_{c1Ncs} , r_d , MSF, etc...

I metodi di B&I (2014) and J&al (2006) sono stati ritenuti i più affidabili per le litologie incontrate nell'area del Mugello (spesso **materiali di transizione**)

(Facciorusso et al. , 2017. J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. 141, n. 12, pp. 1032-1051)

STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

#3 Determinazione indiretta del contenuto di fine FC



CPTe N. 048002PGC127 (Barberino del Mug)

Quando si utilizzano metodi basati sulle CPT il valore di FC viene ricavato indirettamente

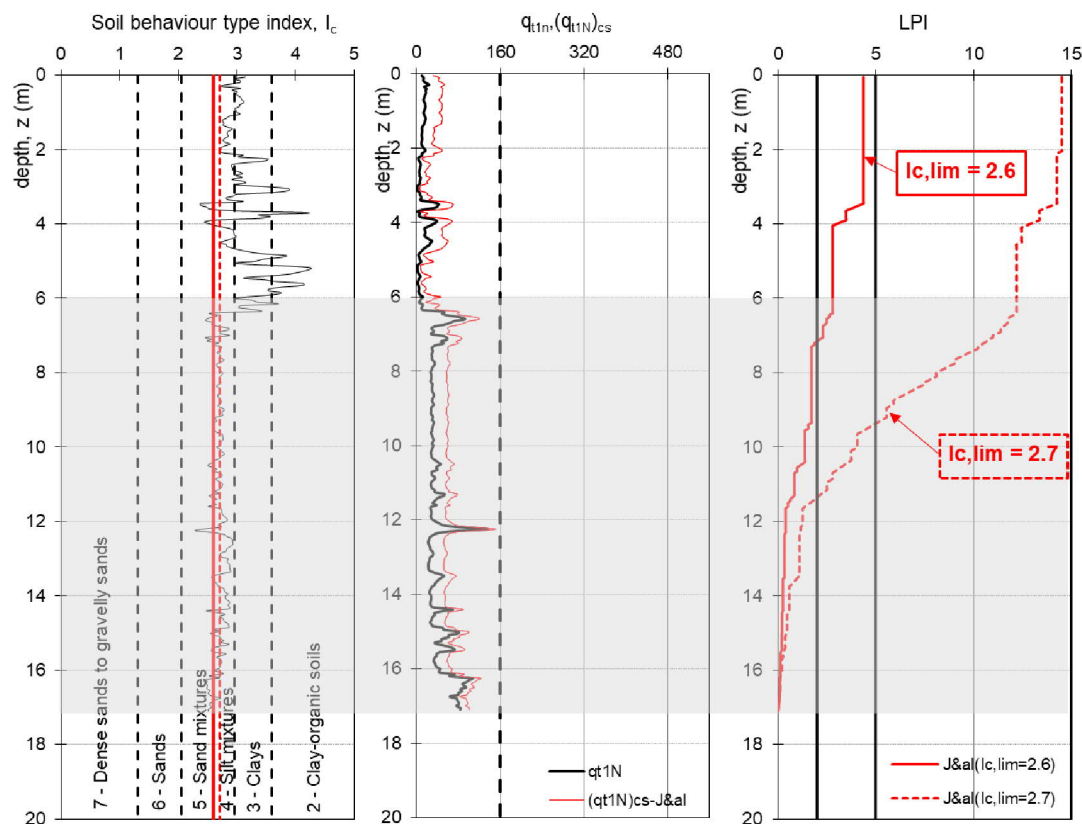
Il contenuto di fine influenza il valore di I_c → CRR → LPI

Per una stima più affidabile di LPI sarebbe preferibile disporre di curve granulometriche....

STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

#4 Valore di $I_{C,lim}$ per l'esclusione dal calcolo di FSL

Alle profondità per cui $I_C > I_{C,lim}$ il terreno è considerato non liquefacibile



La scelta di $I_{C,lim}$ influenza sensibilmente il valore di LPI soprattutto in presenza di 'terreni intermedi'

Ma qual è il valore di cut-off più appropriato?

LPI dovrebbe essere calcolato utilizzando diversi valori di cut-off

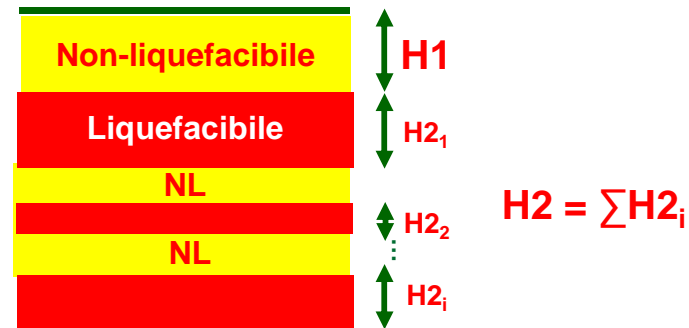
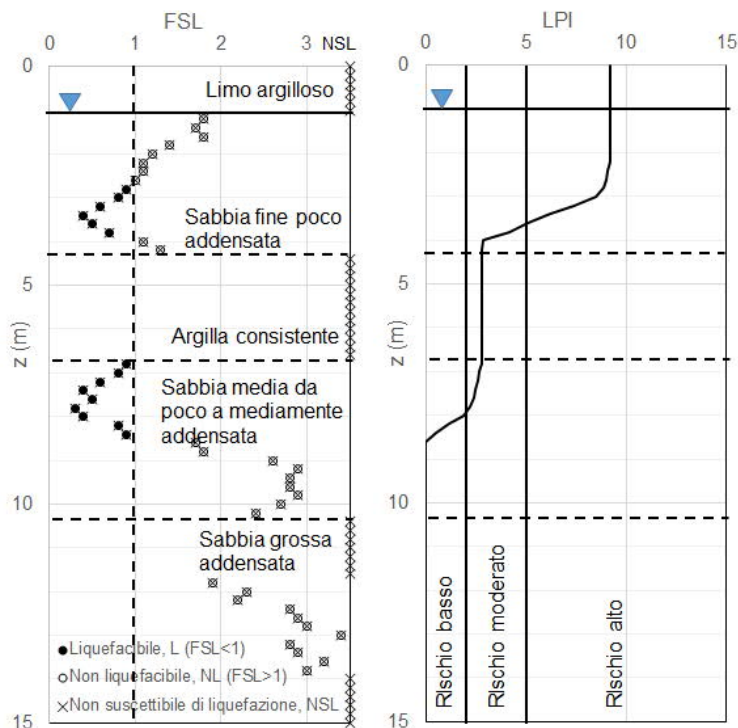
(Boulanger and Idriss 2014, Cubrinovski et al 2018)

STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

#5 Utilizzo di LPI come unico parametro indice per la liquefazione

Oltre all'Indice del Potenziale di Liquefazione (LPI), potrebbero essere usati altri indici per definire meglio la pericolosità di liquefazione o gli effetti indotti, ad es:

- Indice di Probabilità di Liquefazione (LPbi)
- Indice di Cedimento per Liquefazione (LSI)
- Indice di Spostamento Laterale (LSpl)
- Profondità del primo strato liquefacibile (H1)
- Spessore totale degli strati liquefacibili (H2)

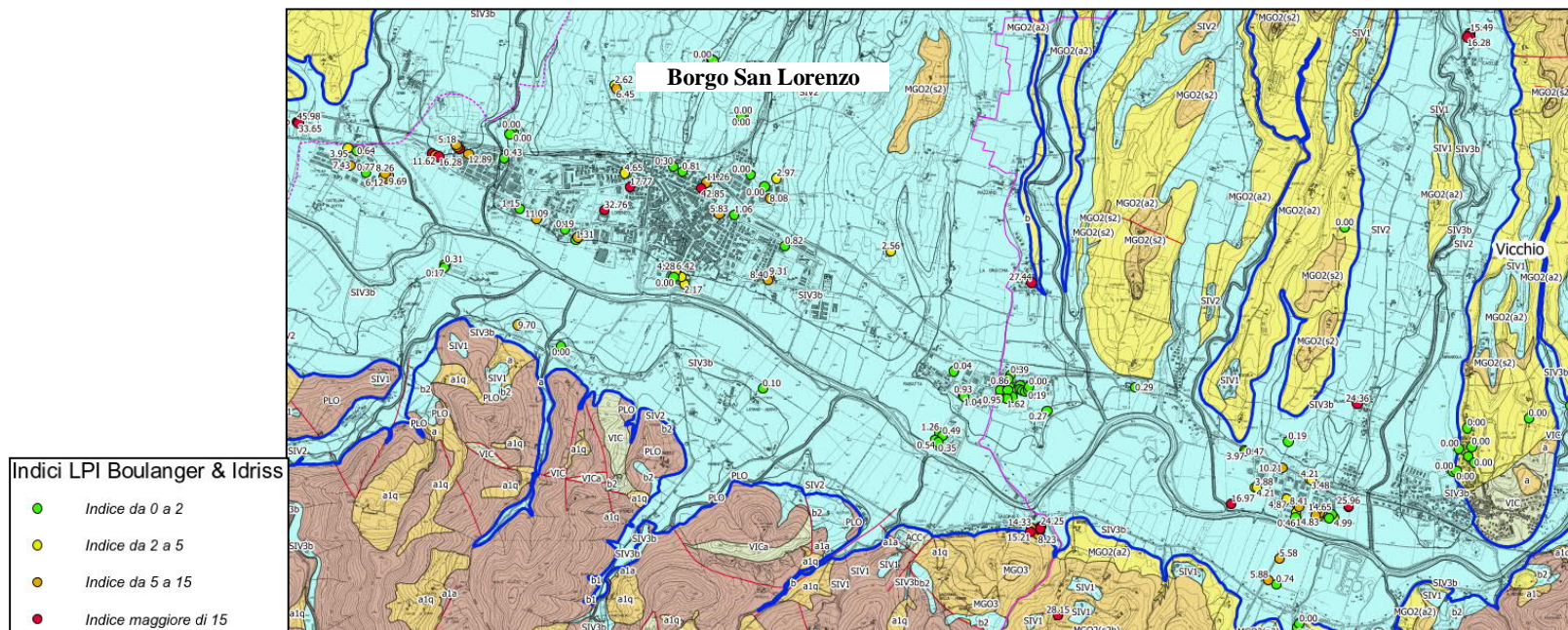


STUDIO DI LIQUEFAZIONE CON METODI SEMPLIFICATI - PRINCIPALI CRITICITÀ -

#6 Distribuzione areale di LPI

Generalmente la densità e la distribuzione delle prove in sito non consentono di definire in maniera uniforme l'andamento di LPI all'interno dell'area in esame

A questo scopo i risultati dovrebbero essere supportati da dati aggiuntivi di tipo geologico, trattati con procedure statistiche e mappati con apposite tecniche



STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Le mappe con i risultati dello studio condotto sono state redatte dal Settore Sismica - Regione Toscana - e sono tutte disponibili on-line

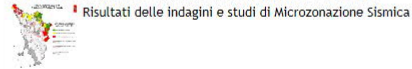
Speciali | Rischio sismico

Rischio sismico

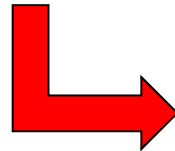
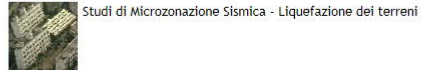
- Informazione e formazione
- Fattori di rischio
- Banche dati
- Contributi
- Emergenza
- Normativa e progettazione



Risultati indagini e studi di microzonazione sismica



Studi sulla suscettibilità alla liquefazione dei terreni



CARTOGRAFIE DI DETTAGLIO CON STIMA DEL POTENZIALE LIQUEFAZIONE

- Mappe di dettaglio della Provincia di Lucca con la stima dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) secondo le metodologie semplificate Boulanger & Idriss 2014, Juang et Al. 2006 e Robertson e Wride 1998;
- Mappe di dettaglio della Provincia di Pisa con la stima dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) secondo le metodologie semplificate Boulanger & Idriss 2014, Juang et Al. 2006 e Robertson e Wride 1998;
- Mappe di dettaglio della Versilia con la stima dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) secondo le metodologie semplificate Boulanger & Idriss 2014, Juang et Al. 2006 e Robertson e Wride 1998;
- Mappe di dettaglio del Mugello (distinte tra Barberino di Mugello e gli altri comuni) con la stima dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) secondo le metodologie semplificate Boulanger & Idriss 2014 (Barberino | altri comuni), Juang et Al. 2006 (Barberino | altri comuni) e Robertson 2009 (Barberino | altri comuni)

Tali studi possono essere presi come riferimento, ai fini delle metodologie utilizzate, per la stesura di mappe areali del potenziale di liquefazione per gli studi di microzonazione sismica.

Inoltre di seguito sono disponibili, nelle more della creazione di un Portale WEB-GIS, gli shapefile per la consultazione di tutte le verticali di indagini per le quali è disponibile la stima del potenziale di liquefazione dei terreni.

CPT_Mugello

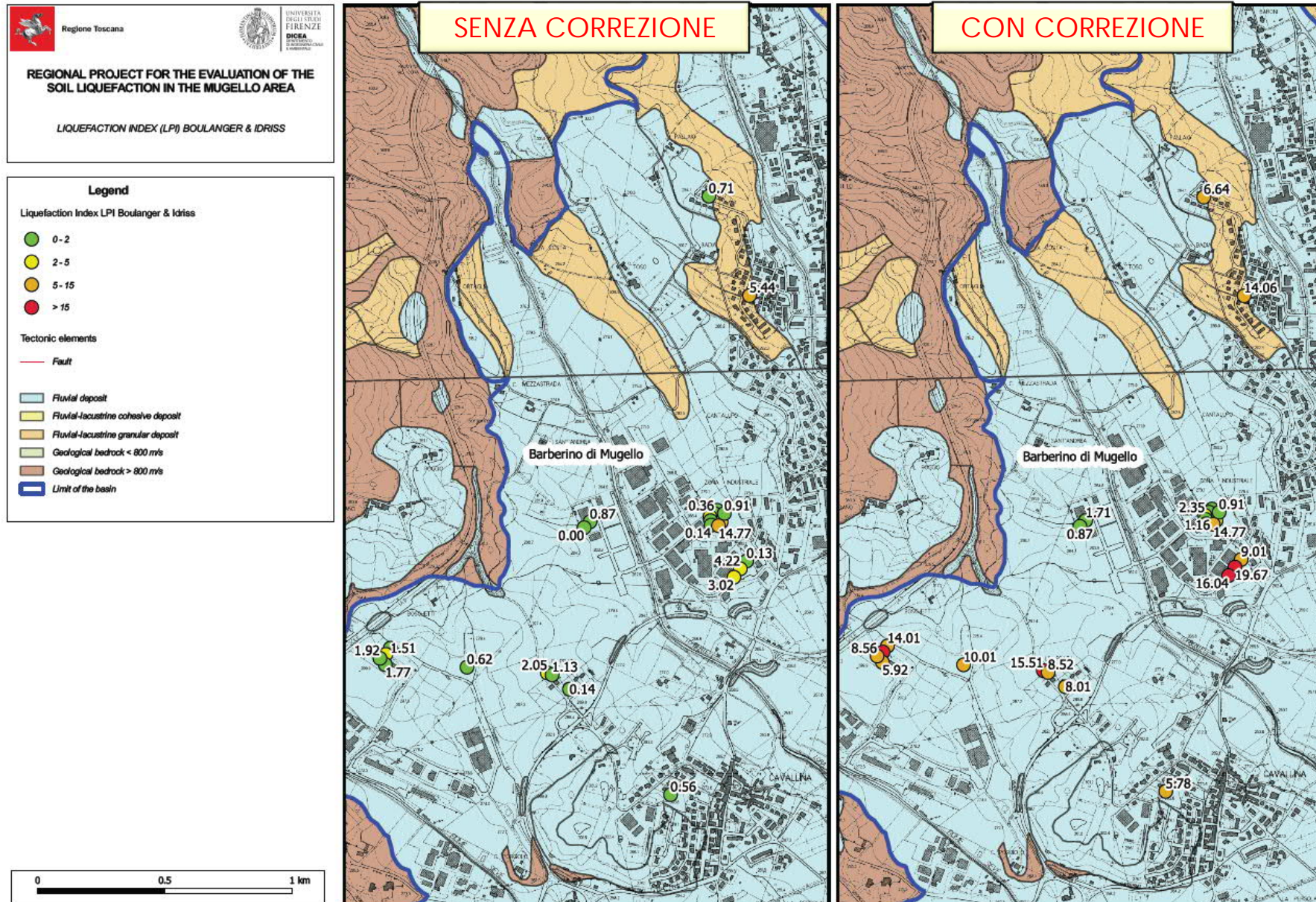
CPT_Provincia Lucca

CPT_Provincia Pisa

CPT_Provincia Versilia



BARBERINO DI M.LLO - MAPPA DI LPI – Metodo di B&I senza e con correzione



STUDIO DI LIQUEFAZIONE NELL'AREA DEL MUGELLO

Conclusioni

1. Alcune zone dell'area del Mugello sono potenzialmente liquefacibili
2. Per la microzonazione di 3° livello è stato condotto uno studio sulla liquefazione utilizzando metodi semplificati basati sulle prove CPT
3. Lo studio ha evidenziato alcuni aspetti critici, generalizzabili ad altri contesti tipici delle valli appenniniche dell'Italia Centrale, legati a:
 - ❖ utilizzo di prove meccaniche
 - ❖ metodi utilizzati per il calcolo del fattore di sicurezza
 - ❖ presenza diffusa di materiali di transizione (miscele di sabbie e limi)
 - ❖ scelta di parametri indice rappresentativi
 - ❖ distribuzione spaziale e densità delle prove disponibili



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

LA PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO E GLI STUDI DI PERICOLOSITÀ SISMICA DEL MUGELLO

Studi del potenziale di liquefazione dei terreni nell'area del Mugello – Claudia Madaï

Firenze, 23 Settembre 2019

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

