

## **PERICOLOSITÀ DA LIQUEFAZIONE VALUTATA MEDIANTE ANALISI STATISTICA DI GEODATABASE**

Luca Paoella

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale  
luca.paoella@unicas.it*

Rose Line Spacagna

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale  
rlspacagna@unicas.it*

Gabriele Chiaro

*University of Canterbury (Christchurch, N. Z.)  
gabriele.chiaro@canterbury.ac.nz*

Giuseppe Modoni

*Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale  
modoni@unicas.it*

### **Sommario**

La pericolosità associata ad un dato fenomeno costituisce uno dei fattori più importanti e difficili da quantificare nelle analisi di rischio, a maggior ragione quando si tratta di fenomeni complessi come nel caso della liquefazione sismica.

Il presente lavoro illustra sinteticamente uno studio della pericolosità indotta al suolo da liquefazione basato su un caso campione statistico particolarmente significativo, il terremoto (Mw 6.2) che ha colpito Christchurch, Nuova Zelanda, del 2011. La notevole mole di dati disponibili, relativi alle caratteristiche geotecniche del sottosuolo, unitamente al rilievo dei danni ha consentito innanzitutto di caratterizzare la suscettibilità a liquefazione dell'area, indipendentemente dall'evento sismico, quindi di correlare statisticamente le diverse grandezze e di derivare delle curve di vulnerabilità del suolo.

### **1. Introduzione**

Le metodologie per la valutazione del rischio hanno origine negli anni '60 negli USA e sono progressivamente divenute uno strumento di analisi molto diffuso ed apprezzato per la previsione del danno indotto da sisma, soprattutto in seguito al terremoto di S. Fernando (California), del 1971 (M 6.6). Esse prevedono che il dato fenomeno venga caratterizzato dal punto di vista meccanico, individuando per l'oggetto dell'analisi i fattori capaci di causare il danno e la loro probabilità di accadimento durante la sua vita utile (pericolosità), la propensione dell'oggetto esposto a danneggiarsi (vulnerabilità) e il suo valore (esposizione). Dalla convoluzione di questi tre fattori si ottiene il livello di rischio, definito come la perdita attesa, connessa al manifestarsi di un fenomeno, per una certa area in un dato periodo ("World Meteorological Organization, 2006"). Con il passare del tempo, queste analisi sono state estese a fenomeni e sistemi sempre più complessi, chiamando in causa le comunità e mirando a valutare non solo le ripercussioni economiche, ma anche aspetti sociali come il peggioramento della qualità della vita, la capacità di recupero dall'evento, la resilienza.

Mentre i primi studi erano incentrati sulla quantificazione della perdita di vite umane, nei decenni successivi il discorso ha coinvolto anche le strutture e infrastrutture. Negli anni '90, il NIBS sviluppò la

procedura “HAZUS” (FEMA, 1998) che inglobava i metodi quantitativi esistenti al fine di prevedere la perdita economica associata ai maggiori fattori di pericolo naturale (terremoti, frane, eruzioni vulcaniche e tsunami). Sebbene nata per studi su scala regionale e fortemente contestualizzata al territorio statunitense, questa metodologia è stata inserita e riadattata in numerosi software tra cui Selena (NORSAR 2004), RiskScape (GNS and NIWA) e OpenQuake (GEM). Sebbene sia raramente causa di perdita di vite umane, la liquefazione sismica è un fenomeno capace di determinare ingenti danni economici ed avere ripercussioni gravi sulla capacità di recupero delle comunità. Si tratta di un fenomeno complesso il cui innesco è determinato dalla concomitanza di diversi fattori quali l’entità del sisma e la presenza nel sottosuolo di terreni sabbiosi sciolti posti al di sotto della falda idrica. La variabilità delle manifestazioni osservate al suolo, sommata all’interazione con edifici e opere di caratteristiche strutturali molto diverse, determina la necessità di analizzare le situazioni caso per caso, valutando l’interazione tra terreno e struttura con modelli molto accurati. Tutto ciò si scontra con l’esigenza di valutare il rischio ad una scala territoriale molto più ampia rispetto alle consuete analisi geotecniche, chiamando in causa interi centri abitati o porzioni di territorio ancora maggiori.

Negli anni scorsi, per alcune regioni colpite da intensi fenomeni di liquefazione, si è percepita la necessità di mettere a fattore comune le informazioni disponibili creando database georeferenziati che fornissero un quadro generale delle condizioni di rischio e consentissero di affrontare il problema della mitigazione in un prospetto più ampio e documentato. Tali informazioni, unite ad un accurato rilievo dei danni osservati a seguito di eventi catastrofici, assumono un elevato rilievo scientifico in quanto permettono di formulare empiricamente criteri per la valutazione delle componenti del rischio o di validare procedure di natura teorica.

## 2. Pericolosità da liquefazione

Come visto in precedenza, l’analisi del rischio presuppone che si identifichino gli oggetti dell’analisi e se ne valutino i diversi fattori caratteristici (pericolosità, vulnerabilità, esposizione). Considerando come oggetti le strutture e infrastrutture presenti in un dato territorio, in diversi paesi (DPC 2017, MBIE 2016, Yasuda e Ishihawa, 2018) è invalsa la prassi di caratterizzarne la pericolosità da liquefazione mediante alcuni indicatori degli effetti al suolo (*free field*). Tra questi, i più diffusi sono l’indice del potenziale di liquefazione LPI (Iwasaki et al., 1978), il cedimento post-liquefazione  $w$  (Zhang et al., 2002) o l’indice di cedimento LDI (Zhang, 2004), l’indice di severità LSN” (van Ballegooy et al., 2014). Di seguito si riportano le definizioni per i due indicatori maggiormente utilizzati:

$$LPI = \int_0^{20\text{ m}} F_1(z)w(z)dz$$

$$LSN = 1000 \int_0^{20\text{ m}} \frac{\varepsilon_v(z)}{z} dz$$

Essi quantificano i danni al suolo integrando gli effetti della liquefazione stimati nei primi 20 m di profondità. In entrambi i casi, l’insorgere della liquefazione alle diverse profondità viene valutato mediante il fattore di sicurezza a liquefazione (F), ottenuto dividendo il rapporto tensionale ciclico  $\tau/\sigma'_v$  in grado di produrre liquefazione (CRR) per il valore indotto dal sisma (CSR):

$$CSR = 0.65 * \left( \frac{a \text{ max}}{g} \right) * \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) * rd$$

Il fattore CRR viene tipicamente valutato con metodi empirici (Boulanger & Idriss, 2014) redatti osservando l’insorgenza della liquefazione in relazione ai risultati di comuni prove geotecniche in situ

(CPT, SPT, Vs). La efficacia di questi indicatori nel rappresentare gli effetti della liquefazione al suolo deve essere provata in un numero situazioni reali, in cui le grandezze sopra definite possano essere valutate con sufficiente precisione e confrontate con i danni realmente osservati. Questo è l'obiettivo del presente lavoro svolto prendendo a riferimento il caso campione di Christchurch (in Nuova Zelanda) per il quale sono disponibili notevoli quantità di dati sia in termini di caratteristiche geotecniche del sottosuolo, sia come danni rilevati al suolo a seguito di eventi sismici. Le prove geotecniche sono state analizzate singolarmente con una procedura automatizzata e gli indicatori sono stati riportati in ambiente GIS, interpolati e rappresentati su mappa impiegando metodi geostatistici avanzati che hanno permesso di ridurre al minimo gli errori e valutare l'incertezza delle stime.

### 3. Esempi di analisi

A seguito di alcuni eventi sismici che hanno prodotto ingenti danni da liquefazione, come la sequenza sismica di Christchurch 2010-2011 e 2016, il terremoto dell'Emilia del 2012, il terremoto di Kumamoto (Giappone) 2016, la comunità scientifica ha ritenuto di coadiuvare le strategie di protezione e ricostruzione con la creazione di database che favorissero la condivisione di dati e supportassero le successive valutazioni tecniche, politiche ed economiche. Uno degli esempi più emblematici è rappresentato dal *Canterbury Geotechnical Database* CGD, istituito e finanziato dal Governo Neozelandese (MBIE) e dall' *Earthquake Commission* (EQC), in seguito alla sequenza sismica di Christchurch del 2010-2011, caratterizzata da 5 scosse principali e soprattutto da estese evidenze di liquefazione. Sebbene nato con lo scopo di acquisire e condividere dati geotecnici tra soggetti pubblici e privati per favorire la ricostruzione di Christchurch, il successo con cui è stato recepito dagli stakeholders ne ha determinato la trasformazione nel *New Zealand Geotechnical Database* (NZGD) che permette di eseguire valutazioni più generali sull'impatto dei fenomeni naturali sulla resilienza dell'intera comunità neozelandese. Dal punto di vista delle indagini geotecniche disponibili, a maggio 2018 il NZGD comprendeva numerosissime prove penetrometriche CPT, sondaggi, installazioni piezometriche, prove geofisiche e numerose indagini di laboratorio (Figura 1a).

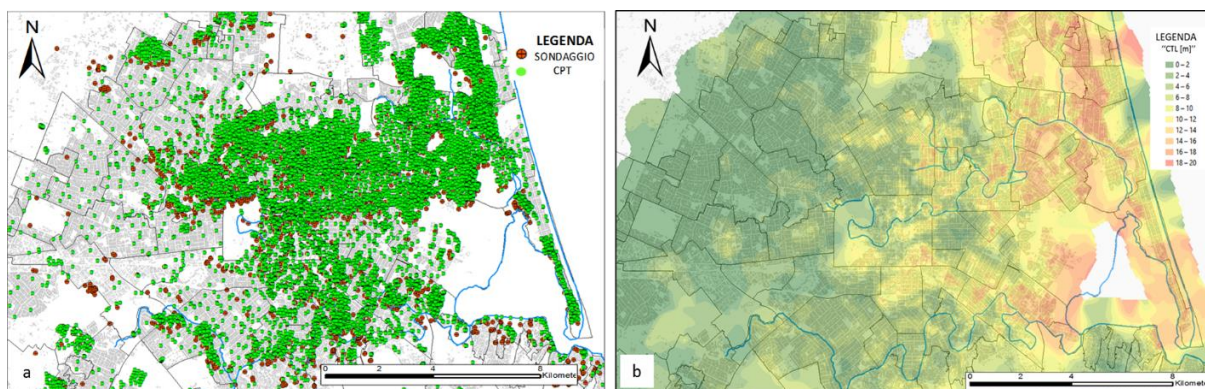


Figura 1. a) Indagini geotecniche disponibili per l'area di Christchurch dal NZGD; b) mappa degli spessori cumulati di terreno potenzialmente liquefacibili, ricavata dal processamento di prove CPT.

Per il presente studio si sono selezionate oltre 15.000 CPT, ne è stato omogeneizzato il formato per poterle processare in maniera automatizzata e, prima ancora di calcolare i valori degli indicatori LPI e LSN, per ciascuna di esse è stato valutato il livello di suscettibilità a liquefazione sulla base dei fattori predisponenti secondo i criteri proposti dallo studio di "Microzonazione Sismica del Comune di Sant'Agostino" (a cura dell'Università di Ferrara, 2014). La mappa riportata in figura 1b, rappresenta un esempio di suscettibilità a liquefazione, quantificata in termini di spessore cumulato di terreno potenzialmente liquefacibile. Tale spessore è stato ottenuto puntualmente tenendo conto dei valori

dell'indice  $I_c$  calcolati dalla prova CPT e della posizione della falda.

La successiva analisi della pericolosità di liquefazione, svolta per i vari terremoti della sequenza che ha interessato la città, è qui riportata per l'evento più grave del 22 febbraio 2011. Il fattore di sicurezza è stato calcolato applicando la procedura proposta da Boulanger & Idriss (2014), mentre, oltre all'indice LPI tradizionale, è stato calcolato anche quello ispirato alle curve di Ishihara "LPI<sub>ISH</sub>" (Maurer, 2014). I valori degli indicatori sono stati quindi riportati su mappa interpolandoli con un'analisi geostatistica. La mappa dell'indicatore LSN, mostrata a titolo di esempio in Figura 2, rivela una distribuzione eterogenea dei valori sul territorio con una concentrazione delle zone potenzialmente liquefacibili, corrispondenti a  $LSN > 50$  lungo il corso del fiume Avon. Tale distribuzione risente della geologia del sottosuolo costituita prevalentemente da depositi alluvionali.

Il NZGD è a sua volta interconnesso al *Canterbury Earthquake Buiding Assessment (CEBA) Database* che include sia rapide ispezioni visive ai fini del riconoscimento di danno post-sisma (Livello 1 di informazione), sia valutazioni più approfondite della performance sismica delle strutture (Livello 2 di informazione). Ulteriori banche dati sono state organizzate ai fini di studiare la vulnerabilità delle infrastrutture e ponti o delle condotte idriche (e.g. Cubrinovski et al., 2011). Nella Figura 3 si riporta la mappa dei danni da liquefazione prodotti sugli edifici dall'evento del 22 febbraio 2011. Vale la pena osservare che, per la tipologia degli edifici presenti nella città, tipicamente costituiti da strutture in legno piuttosto leggere e dotate di fondazioni superficiali poco idonee ad assorbire cedimenti differenziali, vi è una quasi perfetta coincidenza tra danni agli edifici ed effetti al suolo. Pertanto, ai fini delle presenti analisi, si è ritenuto di considerare la Figura 3 come mappa degli effetti al suolo e la relativa graduazione come indicatore del danno.

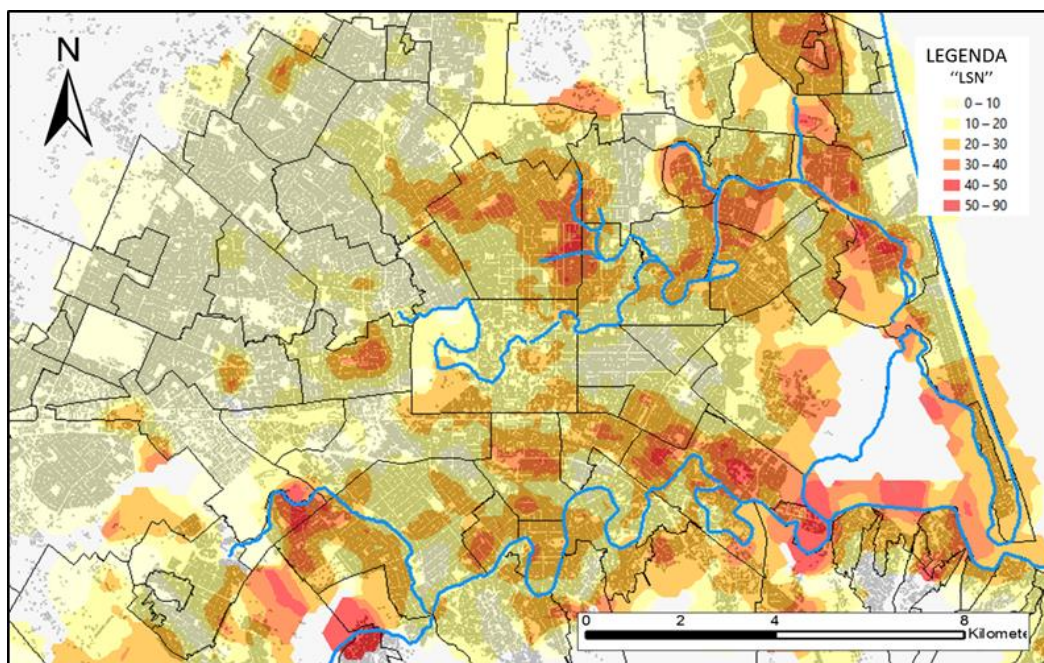


Figura 2. Interpolazione geostatistica dei valori di puntuali LSN, valutati per il terremoto di Christchurch (Mw 6.2) del 22 Febbraio 2011.

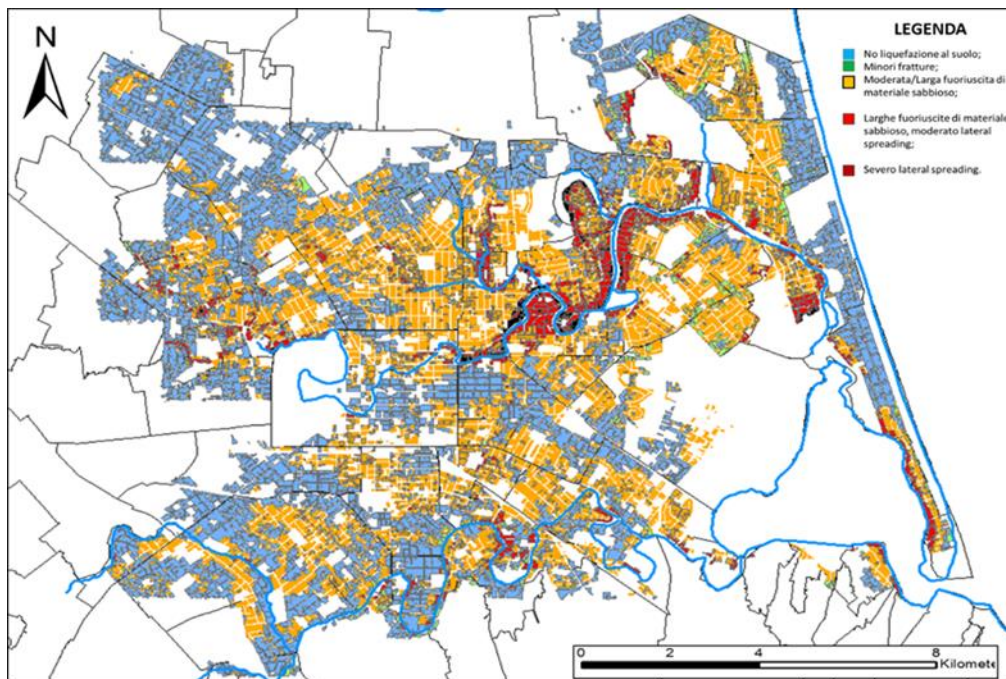


Figura 3. Osservazioni di liquefazione indotta al suolo dal terremoto di Christchurch del Febbraio 2011, NZGD.

Le informazioni rappresentate nelle Figure 2 e 3 sono state quindi incrociate per valutare l'esistenza di possibili relazioni tra indicatore del danno stimato e danno realmente osservato. Nella fattispecie, si è valutata dalla Figura 3 la posizione dei centroidi di ogni poligono e si è ricavato dalla Figura 2 il valore corrispondente dell'indicatore LSN. Tale operazione è stata possibile grazie all'interpolazione geostatistica che consente di ricavare informazioni quantitative anche per le zone non direttamente investigate. L'intero range di variazione del valore di LSN è stato suddiviso in cinque classi aventi lo stesso numero di campioni e, per ciascuna di esse, sono state valutate le percentuali di aree caratterizzate rispettivamente dalle quattro tipologie di danno definite in Fig. 3 (nessun danno, minori fratture, moderate fuoriuscite di materiale sabbioso e larghe fuoriuscite di materiale sabbioso/lateral spreading).

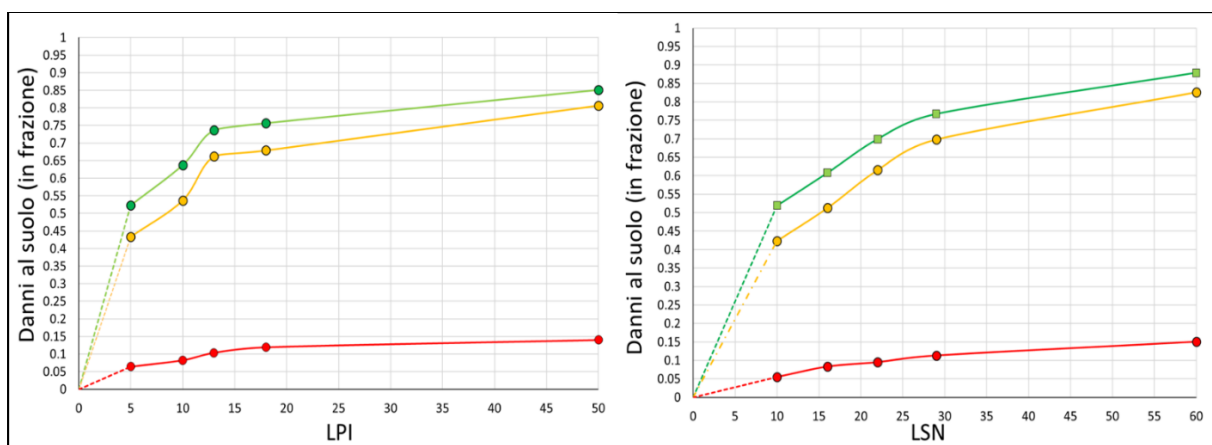


Fig. 4 Esempio di pericolosità da liquefazione ottenuta empiricamente per il sottosuolo di Christchurch sulla base del confronto tra la mappa delle evidenze superficiali di liquefazione e quelle degli indicatori. La curva in verde si riferisce alle evidenze minori di fratture, quella in giallo alle moderate/larghe fuoriuscite di sabbia e quella in rosso alle severe fuoriuscite di sabbia/lateral spreading.

Dato che non tutte le particelle catastali sono state ispezionate in seguito al terremoto dal team di ingegneri preposto, il campione su cui si basa l'analisi non rappresenta la totalità del territorio di Christchurch. In particolar modo, tale lacuna di informazioni riguarda prevalentemente le aree interne della città, meno interessate da liquefazione e, allo stesso tempo, caratterizzate da valori di  $LSN < 10$  e  $LPI < 5$ . Per questa ragione, si è assunto che (per entrambi gli indici) le tre curve partano da zero ed i rispettivi tratti iniziali sono rappresentati graficamente con rette tratteggiate. Nonostante ciò, sia per il *Liquefaction Potential Index* che per il *Liquefaction Severity Number* i risultati ottenuti evidenziano un trend crescente della frazione di particelle danneggiate all'aumentare del valore dell'indicatore (Fig. 4).

#### **4. Conclusioni**

Il caso di studio di Christchurch descritto in precedenza testimonia l'importanza della messa a punto di geodatabase su cui basare le analisi di rischio che contemplino anche il fenomeno della liquefazione sismica. Infatti, in seguito al processamento automatizzato di oltre 15 000 CPT contenute nel New Zealand Geotechnical Database, è stato possibile caratterizzare la suscettibilità dell'area, calcolare diversi indicatori di pericolosità da liquefazione e studiarne la distribuzione spaziale descritta attraverso mappe realizzate su piattaforma GIS mediante interpolazione geostatistica di risultati puntuali. Successivamente, incrociando i due layer di informazioni, in maniera empirico-statistica sono state ricavate per il sottosuolo di Christchurch delle curve rappresentative della pericolosità da liquefazione. I risultati ottenuti, seppur con alcune limitazioni, evidenziano una proporzionalità tra indicatori calcolati ed effetti osservati. Se confermato da nuove evidenze, tale approccio potrebbe tradursi in un valido strumento di previsione del danno indotto al suolo dalla liquefazione sismica, applicabile a contesti e scenari diversi.

#### **Ringraziamenti**

Tale lavoro rientra nell'ambito del progetto "*Liquefact*", finanziato dal programma europeo per la ricerca ed innovazione "*Horizon 2020*" (proposal #700748).

#### **Bibliografia**

- Boulanger R.W., Idriss I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of Civil and Environmental engineering, University of California at Davis.
- Cubrinovski M., Hughes M., Bradley B., McCahon I., McDonald Y., Simpson H., Cameron R., Chsistison M., Henderson B., Orense R., O'Rourje T (2011). Liquefaction Impacts on Pipe Networks. Research Report 2011-04, Civil & Natural Resources Engineering.
- Dipartimento della Protezione Civile (2017): Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ). Versione 1.0, Roma 2017.
- FEMA/NIBS, HAZUS - Earthquake Loss Estimation Methodology, Vol. 1, 1998.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978). A Practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. [conference] // 2nd International conference on Microzonation. - 1978. - pp. 885-896.
- Maurer B. W., Green R. A., Oliver S. Taylor O. S., (2014). Moving Towards an Improved Index for Assessing Liquefaction Hazard: Lessons from Historical Data. *Soils and Foundations*, 55(4): 778-787.
- Ministry of Business, Innovation & Development – NZGS (2016): Recommendation after the Canterbury Earthquake sequence (2010-2011).
- van Ballegooy S., Malan P., Lacrosse V., Jacka M.E., Cubrinovski M., Bray J.D., O'Rourke T.D., Crawford S.A., Cowan H. (2014). Assessment of Liquefaction-Induced Land Damage for Residential Christchurch. *Earthquake Spectra*, Volume 30, No. 1, pages 31–55, February 2014.
- Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra (2014): Microzonazione sismica del Comune di Sant'Agostino.
- Yasuda S., Ishikawa K. (2018): Liquefaction-induced Damage to Wooden Houses in Hiroshima and Tokyo during Future Earthquakes. 16 ECEE, Thessaloniki, Greece, June 2018.
- Zhang G., Robertson P.K., Brachman R.W.I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1168–80.
- Zhang G., Robertson P.K., Brachman R.W.I. (2004). Estimating liquefaction-induced Lateral Displacements from CPT for level ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering/ AUGUST 2004*.