FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

Suelos Licuables: Fenomenología, criterios de susceptibilidad, método simplificado de Seed e Idriss, obras de mitigación y recopilación de casos en Ecuador y Argentina.

Josué R. VAZQUEZ.

josuerodrigovazquez@gmail.com

RESUMEN:

Suelos con arenas finas, arenas limosas o con baja presencia de finos, tienden a licuar al ser sometidos a cargas cíclicas como las de un sismo. Actualmente, se han realizado estudios en diferentes muestras que han pasado por el proceso de licuefacción, la finalidad ha sido encontrar relaciones y establecer criterios tanto geológicos, históricos, composición y estado para entender el comportamiento de dicha muestra.

Diferentes ensayos de campo o de laboratorio, son herramientas para correlacionar parámetros e interpretar la licuefacción. El ensayo SPT se caracteriza por aportar indirectamente al método simplificado de Seed e Idriss que utiliza la densidad relativa del material y el factor N normalizado.

Como importancia del caso, se muestran diferentes problemas que genera la licuación de suelos y un corto listado de estos fenómenos en la costa del Ecuador y en la región de Cuyo de la Argentina.

Palabras clave: *Licuación, arenas, sismo.*

1. INTRODUCCIÓN

La licuación es un fenómeno geotécnico que se produce en suelos no cohesivos y saturados (arenas y limos) sometidos a cargas vibratorias cíclicas como los fenómenos sísmicos. El comportamiento dinámico de los suelos genera un reacomodo de partículas, que, al estar en condiciones saturadas, eleva la presión de poros y reduce la presión efectiva; generando una pérdida repentina de resistencia y rigidez, produciendo asentamientos diferenciales, colapso de estructuras y daños en instalaciones. Estos hechos son la respuesta a la pérdida de capacidad portante del terreno durante terremotos *(Henríquez Pantaleón, 2007)*. Eventos sísmicos en el año 1964 en Alaska y Niigata fueron claves para impulsar la investigación de la licuefacción en suelos.

Para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuar, existen diferentes criterios de análisis y metodologías, empleándose características de un suelo que sufrió licuación para determinar similitudes físicas y mecánicas. El ensayo SPT es una herramienta in-situ que calcula la densidad relativa del suelo e indirectamente define la relación de resistencia cíclica del terreno (CRR), la relación de tensiones cíclicas (CSR) se estima por relaciones ya estudiadas.

Los suelos con mayor potencial a licuar son aquellos que se formaron en la época geológica actual (Holoceno); depósitos aluviales y coluviales son suelos jóvenes con alta permeabilidad y baja densidad relativa. *(PALACIOS, SILVA, & PERUCCA, 2021)*

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La licuación es un fenómeno controversial dentro de la ingeniería geotécnica debido a sus efectos severos en la superficie. Terremotos como el de Alaska en Estados Unidos y el de Niigata en Japón del año 1964 con magnitudes superiores a 7.5 hicieron que este fenómeno sea un caso de estudio primordial para considerar el

comportamiento de los suelos y la seguridad ante eventos sísmicos. *(Henríquez Pantaleón, 2007)*

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la fenomenología, criterios de análisis de susceptibilidad y el método simplificado más frecuente para la evaluación de potencialidad de licuación según las características de un suelo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los efectos de la licuación en términos de pérdida de resistencia, deformaciones y la presión de poros.
- Revisar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo para considerarlo potencialmente como licuable.
- Recopilar diferentes criterios de susceptibilidad de licuación de un suelo en términos de: tipo de suelo, estado tensional, nivel freático y condiciones sísmicas.
- Interpretar la potencialidad de un suelo por medio de la aplicación del método de Seed e Idriss.
- Recopilar principales obras de mitigación ante licuación de suelos y de reconocimiento en campo.

1.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La investigación se basa en una revisión bibliográfica sobre el fenómeno de licuación, características del suelo, criterios de análisis que determinan la susceptibilidad de un terreno frente a un evento sísmico, haciendo énfasis en un método de los muchos que existen actualmente debido a su simplicidad de aplicación. Además, recopilar formas de reconocimiento en campo de manera visual, registrar brevemente casos en Ecuador y Argentina para reconocer la importancia de estudio de este fenómeno.

CAPÍTULO 2: LICUACIÓN DE SUELOS

2.1 FENOMENOLOGÍA

Suelos granulares sueltos y confinados a presiones efectivas altas, se contraen al ser sometidos a esfuerzos de corte. Dicho de otra manera, es el reacomodo de las partículas de arenas finas y limos gruesos no cohesivos saturados que bajo la aplicación de una carga cíclica se produce una reducción de volumen y aumento de presión de poros en condiciones donde no se permite el drenaje total o parcial. (Sottile, Tasso, & Sfriso, 2021)



Figura 1. Hundimiento de carretera en Alaska, 1964.

2.1.1 RESISTENCIA AL CORTE (τ)

La resistencia al corte es una propiedad de los suelos que consiste en la capacidad para oponerse a la deformación y fallar por esfuerzos cortantes. Por tanto, un terremoto, vibraciones naturales o provocadas, generan cargas cíclicas que densifican al suelo por medio del reacomodo de partículas, aumentando la presión de poros (u) y disminuyendo la presión efectiva(σ'), reduciendo la resistencia al corte (τ) de un suelo. (VARGAS, ORTIZ, & FLORES, 2014)

$$\sigma' = \sigma - u$$
$$\tau = c + \sigma \cdot \mathrm{tg}(\phi)$$

Para la condición de suelos saturados τ tiende a valores pequeños y cercanos a cero, siendo la capacidad portante del suelo casi nula:

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \mathrm{tg}(\phi')$$
$$\tau' = \cancel{c'} + (\sigma \cancel{- u}) \cdot \mathrm{tg}(\phi')$$
$$\tau' \approx 0$$

2.1.2 COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE SUELOS GRANULARES

Los suelos granulares sufren cambios en su volumen cuando son sometidos a la acción de esfuerzos cortantes. Partículas sueltas tienden a colapsar al ser sometidas a esfuerzos cortantes

producidas por un sismo debido a la inestabilidad en su estructura. (BRENES, 2008)

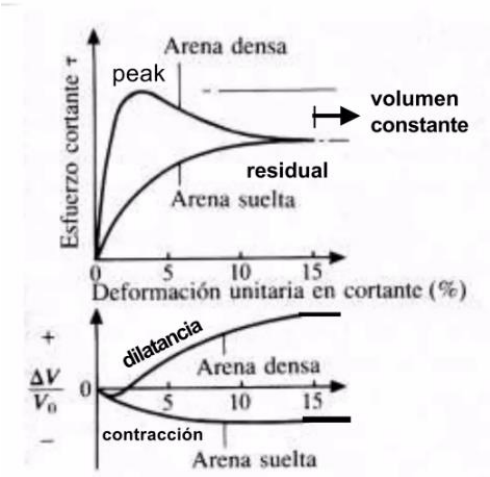


Figura 2. Relación esfuerzo – deformación y deformación – relación de vacíos de una arena suelta y densa. (LUJÁN, 2023)

2.1.3 AMENAZA SÍSMICA

Un movimiento sísmico presenta una magnitud y un tiempo de duración, aceleración máxima y ciclos. Si la energía liberada por el sismo es alta, y la distancia al epicentro es menor, mayor será la probabilidad de que un suelo pase por el proceso de licuefacción (BRENES, 2008).

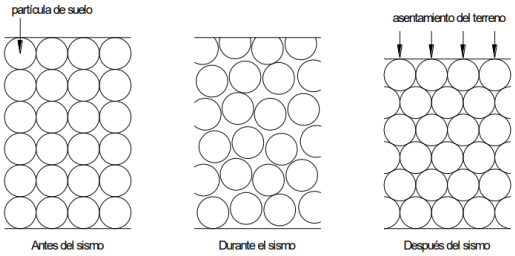


Figura 3. Comportamiento dinámico de suelos granulares. (DIAZ, 2016)

La aceleración que el sismo induce sobre el suelo, genera mayor presión de poros (u). Si el tiempo de duración del sismo es largo, mayor será el reacomodo de partículas granulares y el grado de licuación.

2.2 CONDICIONES DEL SUELO PARA LICUACIÓN

Según Gonzales, L. (2002), en su libro "Ingeniería Geológica", para que un suelo presente licuación, deben presentarse las siguientes condiciones:

- Suelo con baja cohesividad: los suelos no cohesivos o de baja cohesión tienden a reacomodar su estructura, mientras que suelos compactos ya se encuentran consolidados, siendo menos propensos a licuar.
- Suelos conformados por arenas o limos: por sus propiedades y características, tienden a licuarse ante un evento sísmico o vibratorio. Las arcillas y gravas no presentan licuefacción.
- Saturación: un grado de saturación elevado tiende a favorecer la licuación.
- Edad del suelo: Suelos jóvenes son menos densos. Presentan una estructura menos ordenada. Reducen su volumen y aumentan la presión de poros.

2.3 CONSECUENCIAS DE LA LICUACIÓN EN SUPERFICIE Y ESTRUCTURAS

La elevada presión intersticial genera fluidez del agua por espacios con menor presión; como la superficie, fracturas o grietas que estuvieron presentes o que se formaron por el evento sísmico. Este fenómeno es capaz de hundir, volcar y/o desplazar estructuras sobre la superficie. (ZILIO, D'AMICO, BAEZ, & PALACIOS, 2022)

Después de un fenómeno sísmico, se evidencian diferentes tipos de fallas debido a licuefacción, las características que presentan y las consecuencias tanto en superficie como en infraestructuras.

Método de Falla	Características	Daños en Superficie y Estructuras
Pérdida de resistencia	El suelo pierde capacidad portante y resistencia al corte debido a la falta de fricción entre partículas.	Asentamientos excesivos, asentamientos diferenciales, voleo de estructuras y colapso. Las redes de tuberías ascienden a superficie.
Desplazamientos laterales	Se presentan desplazamientos en bloques de superficie (generalmente con pendientes suaves <3°).	Genera daños en instalaciones de redes subterráneas, puentes, cimentaciones superficiales de estructuras, deslizamiento

		s en áreas cercanos a flujos de agua.
Falla de flujo	Se desarrollan en terrenos con pendientes >3° y produce desplazamientos de metros a kilómetros con velocidades muy altas.	Produce grandes daños a estructuras, colapso, hundimiento, rotura de taludes, deslizamientos.
Oscilación del suelo	Caso de licuación en el subsuelo, terrenos con pendientes menores a las que generan desplazamiento	Asentamientos, grietas en superficie, evacuación de agua y arena por medio de volcanes de arena. Tuberías con daños menores a los demás métodos de falla.

Tabla 1. Tipos de falla del terreno debido a licuación. (DIAZ, 2016)

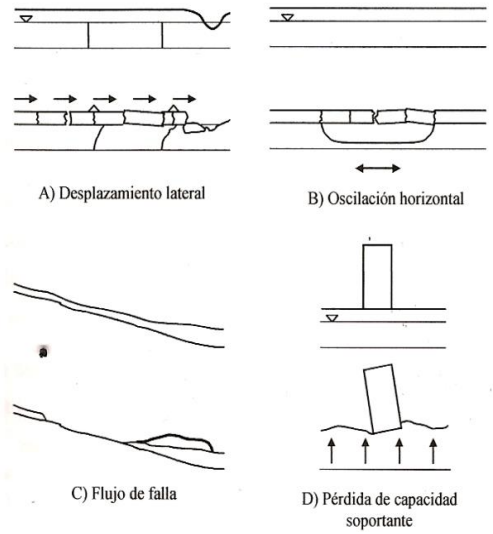


Figura 4. Tipos de falla del terreno debido a licuación. (BRENES, 2008)

2.4 ZONIFICACIÓN PROPENSA A LICUACIÓN

Las zonas principales para que se produzca licuefacción son las costas, playas, deltas fluviales, valles aluviales, lagos o lagunas (existentes o no) o depósitos eólicos debido a su alta proporción de arenas finas y medias con densidad relativa (Dr) bajas y con un alto grado de saturación (Sr).

Generalmente la licuefacción se produce como máximo entre 15 a 20m de profundidad por debajo de la superficie y donde la capa freática no supere los 5m de profundidad. (DIAZ, 2016)

El fenómeno de la licuación de suelo se produce en base a dos condiciones; la primera que el suelo sea susceptible de licuar y la segunda, que la zona sea propensa a eventos sísmicos.

Sismología de la zona
Intensidad sísmica
Magnitud
Distancia al epicentro
Duración del sismo

Susceptibilidad del suelo
Tipo de suelo y tamaño
Profundidad del NF
Dr

Tabla 2. Correlación de Dr y compacidad en base al SPT. (GILER, ORTIZ, RIVAS, & MACIAS, 2023)

2.5 RECONOCIMIENTO VISUAL EN CAMPO

Reconocer un suelo potencialmente licuable antes de un evento sísmico puede ser complejo y requiere de ensayos en laboratorio o un análisis detallado. Sin embargo, existen rastros de licuefacción como los siguientes:

- Historia de licuefacción: Un suelo que ha licuado anteriormente puede volver a licuar si los factores que los produjeron se reproducen nuevamente. Generalmente, un suelo volverá a licuar si presenta un fenómeno sísmico de mayor magnitud o duración por el que ya licuó.
- Ubicación: Zonas cercanas a ríos, costas, lagos o conformados por rellenos de baja densidad son muy susceptibles a que licuen.
- Inclinación de vegetación o postes: la inclinación de árboles y postes inducen a que el suelo presentó licuación y que podría seguir licuando según las condiciones. La vegetación puede mostrar sus raíces hacia la superficie.
-



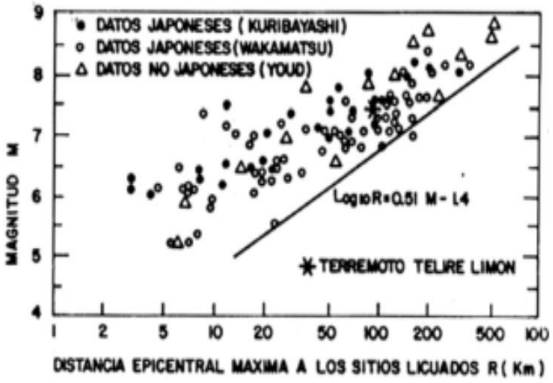
Figura 5. Inclinación de árboles por licuación de suelo.

CAPÍTULO 3: SUSCEPTIBILIDAD DE LICUACIÓN

Suelos con alta posibilidad de perder su resistencia ante solicitaciones dinámicas son arenas finas, arenas mal graduadas (SP) y limos mal graduados (MP). Además, que el NF esté muy cerca de la superficie y una baja compactación con valores N<20 según el ensayo SPT. (DIAZ, 2016)

Según Gonzales, la licuación se ha producido en circunstancias ajenas al suelo de:

1. Terremotos con magnitudes mayor o igual a 5.5 con aceleraciones de mínimo 0.2g.
2. Radios al epicentro de hasta 200km y superior si la magnitud supera una magnitud de 7.5.
3. A 15m bajo la superficie no se han dado casos licuefacción.
4. NF a poca profundidad (menos de 3m). Al pasar los 5m de profundidad la susceptibilidad es casi nula.



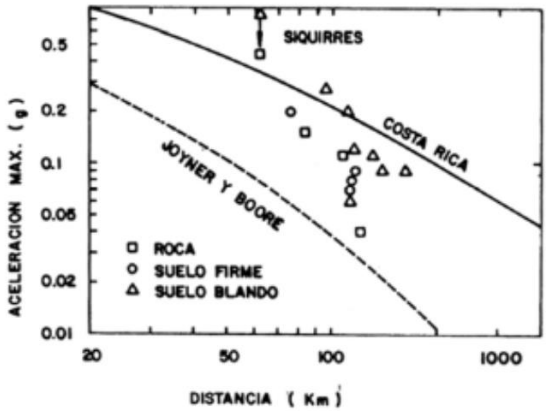


Figura 6. Distancia máxima vs casos de licuación (izquierda) y aceleración máxima vs distancia al epicentro en casos del terremoto en Costa Rica del año 1991. (MORA & YASUDA, 2011)

Mientras que, las características del suelo para definir la susceptibilidad son:

1. Sr (%)= 100 o muy cercano.
2. D_{50} entre 0.05 a 1.0mm
3. Cu < 15
4. Contenido de finos < 10%
5. SPT con N<10 para Df<10m; N<20 para Df>10m

Compacidad	Densidad relativa (Dr)	N (SPT)
Muy suelto	<0.15	<4
Suelto	0.15 – 0.35	4 – 10
Medianamente duro	0.35 -0.65	10 – 30
Denso	0.65 – 0.85	30 – 50
Muy denso	0.85 – 1.00	> 50

Tabla 3. Correlación de Dr y compacidad en base al SPT. (GILER, ORTIZ, RIVAS, & MACIAS, 2023)

3.1 CRITERIOS DE ANALISIS

Para conocer el riesgo de un suelo a sufrir licuación, se requiere evaluar la susceptibilidad. Si un suelo muestra características de licuefacción, se debe estudiar sus parámetros para comprender el fenómeno del sitio. Existen diferentes criterios de análisis que se muestran en orden siguiente:

3.1.1 CRITERIO HISTÓRICO

Diferentes sismos de mediana y alta magnitud establecen registros de licuefacción en suelos. El

brote de arena a la superficie muestra el flujo de material que existe bajo la superficie por medio de la presión de poros. La granulometría de este suelo indica características típicas de un material licuable.

3.1.2 CRITERIO GEOLÓGICO

La susceptibilidad a la licuación en suelos está ligada a su génesis y a las condiciones hidrogeológicas. Depósitos fluviales, aluviales, coluviales y eólicos. Si el nivel freático tiene fluctuaciones, el suelo es propenso a saturar, aumentando la susceptibilidad de licuar.

3.1.3 CRITERIO DE COMPOSICIÓN

Suelos arcillosos en condiciones no drenadas dentro de la relación esfuerzo – deformación, muestran un comportamiento similar a un suelo licuable, pero no licuan. Arenas mal graduadas son propensas a licuar.

Partículas con diámetro promedio de 0.075mm a 0.85mm tienen una alta susceptibilidad de licuefacción, pero también suelos entre 0.02 a 0.075mm y 0.85 a 2.0mm podrían. Se creía que solamente arenas podían sufrir este fenómeno, pero en años recientes se ha evidenciado a gravas y limos. Además, suelos finos pueden licuar si: i) si el 15% de la muestra del suelo posee finos de tamaño menor a 0.005m. ii) LL < 35% iii) humedad natural > 0.9LL y iv) índice de liquidez menor al 75%.

3.1.4 CRITERIO DE ESTADO

El estado de un suelo se considera por su densidad y esfuerzo efectivo. Mayor esfuerzo sobre un suelo suelto, eleva la posibilidad de licuación. De igual manera, un mayor esfuerzo de corte estático incrementa la ocurrencia del fenómeno. Con este criterio se analiza las condiciones naturales en las que se encuentra el suelo tanto en nivel esfuerzos, densidad y condiciones de saturación.

3.2 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DETERMINACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE LICUACIÓN

Existen otros métodos para correlacionar susceptibilidad a licuación y pueden obtenerse parámetros por medio de ensayos como:

- Ensayo de penetración estándar (SPT)
- Ensayo de penetración cónica (CPT)
- Ensayo de velocidad de onda de corte (Vs)
- Ensayos triaxiales cíclicos

3.3 MÉTODOS SIMPLIFICADOS BASADOS EN EL SPT

Existen diferentes métodos que permiten estimar si un suelo de cierta zona es susceptible a licuar en base al uso de ensayos de campo como el SPT, CPT, velocidad de ondas, triaxial cíclico, etc. Para esta investigación se utilizará al ensayo SPT para obtener el valor de resistencia a la penetración (N) con el método simplificado de Seed e Idriss (1971).

El ensayo SPT es una herramienta in-situ que calcula la densidad relativa del suelo e indirectamente define la relación de resistencia cíclica (CRR) del material y la relación de tensiones cíclicas (CSR). Para definir el acontecimiento de licuefacción, el CSR supera al CRR durante el terremoto. El CRR se define en función de la densidad relativa de manera indirecta a partir del ensayo SPT y no considera algunos parámetros del comportamiento del suelo. (Sottile, Tasso, & Sfriso, 2021)

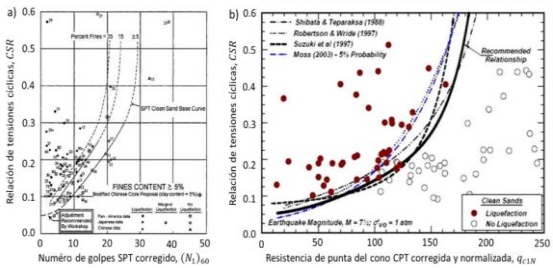


Figura 7. Gráficos de licuación para un sismo de magnitud 7.5 en relación al ensayo SPT (a) y CPT (b). (Sottile, Tasso, & Sfriso, 2021)

Los métodos simplificados consisten en determinar una línea frontera para delimitación de licuación o no licuación de un suelo en gráficos de la CSC y CRR.

3.3.1 MÉTODO SIMPLIFICADO DE SEED E IDRISS

Harry Seed e Izzat Idris estudiaron la licuación del suelo en Niigata, Japón en el año 1964 con ensayos triaxiales cíclicos, donde luego propusieron un método simplificado para

determinar la potencialidad de un suelo a licuar, en base a 126 casos de estudio. (DIAZ, 2016)

El método permite estimar la resistencia cíclica del suelo (CRR), para comparar con la demanda cíclica que el sismo genera (CSR). El suelo es potencialmente licuable si CSR es mayor que CRR.

Para estimar la potencialidad de licuación, este método se basa en el ensayo SPT para correlacionar valores. El número de golpes es corregido por medio de la Ecuación 1. Con parámetros que dependerán del N del ensayo, un factor de corrección (CN) que se define en función de la magnitud del sismo y otros que dependen del ensayo aplicado. CSR se dicta por la Ecuación 2. CRR dependerá de la correlación $N1_{60}$ que se muestra en la Tabla 5. CRR se muestra en la Ecuación 3.

$$(\mathrm{N}_1)_{60} = \mathrm{N} \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S) \qquad (1)$$

$$\mathrm{CSR} = \tau_{\frac{av_{prom}}{\sigma v'_0}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_0}{\sigma v'_0} \cdot r_d \qquad (2)$$

$$CRR = a \cdot N1_{60} \cdot {\sigma v'_0}^{b} \qquad (3)$$

Magnitud	Factor de escala de a_{max}
5.5	1.43
6	1.32
6.5	1.19
7	1.08
7.5	1
8	0.94
8.5	0.89

Tabla 4. Factores de corrección en base a la magnitud del sismo. (Seed e Idriss, 1982)

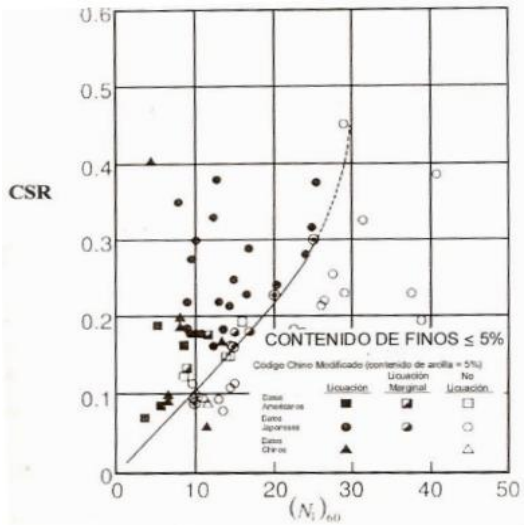


Figura 8. Relación CSR – $N1_{60}$ para arenas con bajo contenido de finos. (BATALLA, 2002)

3.4 MITIGACIÓN DE SUELOS POTENCIALMENTE LICUABLES

Para mitigar la licuación existen técnicas que permiten densificar el material y crear drenajes para liberación de presión. A continuación se exponen algunos métodos que describe:

a- Explosiones
b- Densificación por vibración
c- Vibro compactación
d- Cimentación con pilotes
e- Compactación dinámica
f- Inyecciones de material grueso
g- Columnas de drenaje con material grueso
h- Reemplazo del material

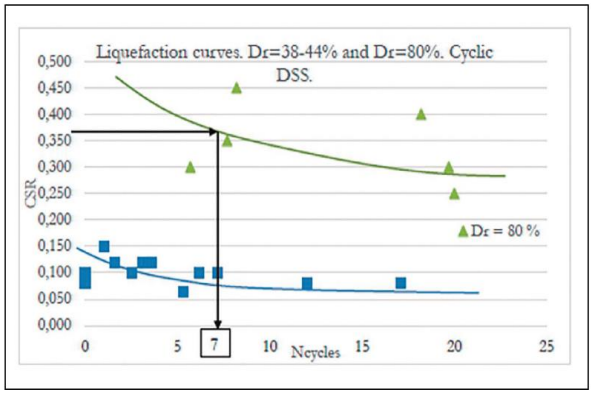


Figura 9. Curvas de licuefacción para una misma muestra de arenas con Dr= 38 a 44% y otra de Dr=80%. (SRISKANDAKUMAR & Somasundaram, 2004)

Según Sriskandakumar (2004), menciona que un suelo al ser compactado, aumenta la relación de esfuerzo cíclico CSR, volviendo menos licuable a un mismo tipo de suelo.

CAPÍTULO 4: CASOS DE LICUEFACCIÓN EN ARGENTINA Y ECUADOR

Como parte de una breve revisión de casos de licuefacción debido a terremotos en Ecuador y Argentina, se plantea implementar un registro fotográfico con una descripción del lugar, evento sísmico y el daño que ha causado tanto en infraestructura como en pérdida de vidas humanas.

4.1 CASOS EN ECUADOR

4.1.1 MACHALA

En el año 2023, se produjo un sismo de magnitud 6.5 a una profundidad de 65Km en la Isla Puná, provincia del Guayas. Este terremoto generó la caída del muelle de cabotaje en la ciudad de Machala, producto de la licuefacción en suelos arenosos finos. El fenómeno se dio a 44km de distancia del epicentro.

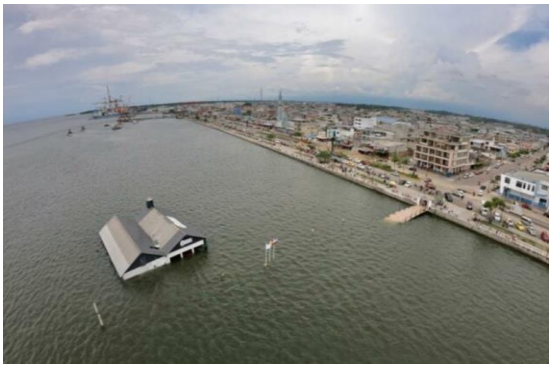


Figura 10. Hundimiento de muelle de cabotaje en Machala, Ecuador. (Fotografía de Diario El Comercio, 2023)

4.1.2 PEDERNALES

Un sismo de magnitud 7.5 ocurrió en la costa del Ecuador en el año 2016. El colapso de estructuras se produjo en diferentes ciudades cercanas al epicentro en Muisne, provincia de Esmeraldas. Los casos más severos de licuefacción se dieron en la ciudad de Pedernales, Manabí; a una distancia de 60km del origen del terremoto.

Vías cercanas a flujos de agua fueron afectadas por deslizamiento del suelo, volcamiento de estructuras, aumento del nivel freático y presencia de cráteres de arena. Se reportó un número de 186 fallecidos en dicha zona.



Figura 11. Desplazamiento de suelo hacia el flujo de agua del río Portoviejo.

4.2 CASOS EN ARGENTINA

4.2.1 SAN JUAN

En la provincia de San Juan, Argentina; se produjeron terremotos en los años 1894, 1944, 1952 y 1977 con fenómenos de licuación registrados como volcanes de arena, grietas, asentamientos diferenciales y varios daños estructurales debido a la pérdida de resistencia del suelo. A continuación, se muestran imágenes que pertenecen al Archivo Fotográfico del Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

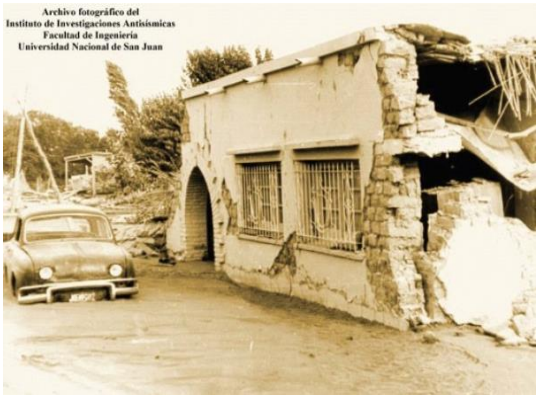




Figura 12. Pérdida de resistencia del suelo y asentamiento de estructuras sobre la superficie en la provincia de San Juan. (Foto: Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan)

4.2.2 MENDOZA

En el año de 1861 se dio un terremoto en la ciudad de Mendoza, con una Ms. 7.2 y a 30km de profundidad con daños irreparables como la pérdida de 12.000 vidas y 1.000 heridos. No existe un registro fotográfico de aquella época, pero si relatos que mencionan la formación de cráteres de arena, derrames de agua hacia la superficie y grietas que expulsaban olores muy fuertes. Además, se menciona que en el sector Lavalle, se generó una grieta que formó un flujo de agua muy grande con alta cantidad de sulfuro.

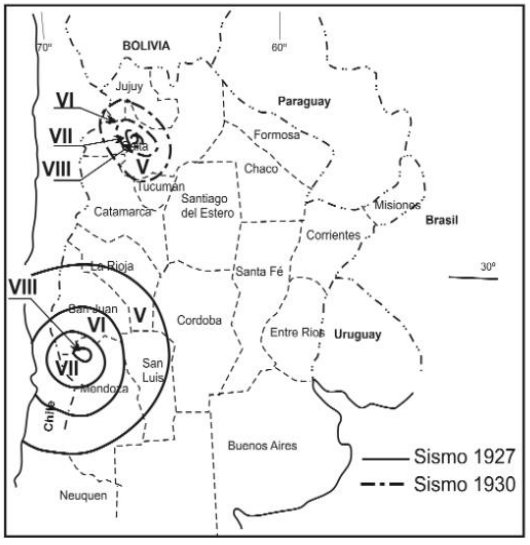


Figura 13. Terremotos con fenómenos de licuefacción en la provincia de Mendoza según intensidad sísmica. (PERUCAA, PEREZ, & NAVARRO, 2006)

CONCLUSIONES

La densidad relativa de un suelo y su granulometría son factores que determinan la licuefacción de un suelo. Los suelos sueltos como arenas finas, arenas limosas o incluso suelos mal graduados son capaces de licuar ante un evento sísmico.

La licuación depende de factores del material y de aspectos externos como la interacción del nivel freático y la actividad sísmica en la zona. Los suelos arenosos con bajo porcentaje de finos tienden a reacomodar sus partículas al ser sometidos a vibraciones, mientras que la presión de poros se dispara y reduce la resistencia al corte del terreno.

El método de Seed e Idriss se podría considerar como una evaluación de pre factibilidad para conocer la potencialidad de un suelo para licuar y que fácilmente se podría ejecutar por medio de correlaciones que demandan resultados del ensayo SPT.

Los métodos de mitigación como el de compactación, aumenta la densidad relativa del suelo y lo vuelve menos propenso a licuar ante un evento sísmico, además de que se podrían complementar si se realizan columnas de grava para la evacuación de presiones que genera el agua entre las partículas.

REFERENCIAS

BATALLA, M. (2002). Licuación de suelos. Informe final del proyecto de graduación. *Licuación de suelos. Informe final del proyecto de graduación.*

BRENES, F. (Junio de 2008). Evaluación del Potencial de Licuefacción en Suelos. *Evaluación del Potencial de Licuefacción en Suelos*. Costa Rica: Escuela Ingeniería en construcción Instituto Tecnológico de Costa Rica.

DIAZ, D. E. (Noviembre de 2016). Vulnerabilidad de construcciones debido a la licuación inducida por sismo (Tesis de Doctorado). *Vulnerabilidad de construcciones debido a la licuación inducida por sismo (Tesis de Doctorado)*. Ciudad de México, Máxico:

Universidad Nacional Autónoma de México.

GILER, K., ORTIZ, E., RIVAS, J., & MACIAS, L. (2023). Evaluación de Probabilidad de Licuefacción en la Ciudad de Calceta – Manabí –Ecuador. *Revista Cientifica Dominio de las Ciencias*, 16.

Henríquez Pantaleón, C. I. (Enero de 2007). Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación (Tesis de Grado). *Mejora de terrenos potencialmente licuables con inyecciones de compactación (Tesis de Grado)*. Madrid, España: Universidad Politecnica de Madrid.

LUJÁN, E. (3 de octubre de 2023). *Resistencia al corte.* Obtenido de slideshare.net: https://es.slideshare.net/WilmerArturoPozoPret2/3-resistencia-al-corte-de-los-suelospptx#78

MORA, S., & YASUDA, S. (1 de junio de 2011). Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón. *Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón*. Revista geológica de America Central. doi:https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13442

PALACIOS, S., SILVA, G., & PERUCCA, L. (mayo de 2021). Susceptibilidad a la licuación de suelos y sedimentos en el valle Ullum-Zonda (31°30’ S-68°25’ O), Precordillera, Andes Centrales, Argentina. *Susceptibilidad a la licuación de suelos y sedimentos en el valle Ullum-Zonda (31°30’ S-68°25’ O), Precordillera, Andes Centrales, Argentina.* Santiago, Chile: AndGeo.

PERUCAA, L., PEREZ, A., & NAVARRO, C. (2006). FENÓMENOS DE LICUEFACCIÓN ASOCIADOS A TERREMOTOS HISTORICOS. SU ANALISIS EN LA EVALUACION DEL PELIGRO SISMICO EN LA ARGENTINA. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 12.

Sottile, M., Tasso, N., & Sfriso, A. (24 de Noviembre de 2021). Evaluación del potencial de licuación por acción sísmica. *Evaluación del potencial de licuación por acción sísmica*. Misiones, Argentina: XXV CONGRESO ARGENTINO DE MECÁNICA DE SUELOS E INGENIERIA GEOTECNICA.

SRISKANDAKUMAR, & Somasundaram. (marzo de 2004). Cyclic loading response of Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests. *Cyclic loading response of Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests*. Vancouver: : University of British Columbia.

VARGAS, C., ORTIZ, R., & FLORES, F. (2014). Análisis de licuación mediante el empleo de modelos de generación de presión de proo durante sismos. *Análisis de licuación mediante el empleo de modelos de generación de presión de proo durante sismos*. Jalisco, México.

ZILIO, M., D'AMICO, G., BAEZ, S. A., & PALACIOS, F. (2022). Volcán antropogénico: una mirada geográfica sobre precosos geológicos y geomorfológicos. *Volcán antropogénico: una mirada geográfica sobre precosos geológicos y geomorfológicos.* La Plata, Buenos Aires, Argentina: Memoria Académica.