

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE
LICUACIÓN DE SUELOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en Ciencias
con mención en Ingeniería Civil**

AUTORES:

Gonzalo Benjamín Avilés Farfán

Darío Augusto Grados Trujillo

José Gonzalo Ochoa Pérez

César Gustavo Pariona Palomino

Arom Neil Vite Heredia

ASESOR:

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, Enero, 2022

RESUMEN

Debido a que la licuación de suelos es un fenómeno que ocurre en varias partes del Perú, surge la necesidad de emplear métodos de análisis de licuación de suelos. Sin embargo, son muy numerosos, por lo que una comparación entre estos es útil para determinar si uno u otro resulta más conveniente dado un cierto escenario particular. Por tanto, el objetivo de este trabajo de investigación es el de realizar un análisis comparativo entre cuatro métodos de licuación de suelos. Específicamente, se busca presentar los cuatro métodos seleccionados, evaluar el potencial de licuación para un suelo dado y comparar los resultados obtenidos y parámetros empleados. Los métodos seleccionados fueron los de: R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014), Kayen R. et al. (2013), Eurocódigo 8 – AENOR (2011) y Cetin et al. (2016). El caso de estudio será para un suelo ubicado en territorio peruano, en específico, en la ciudad de Juliaca en Puno, y para dos sismos: uno esperable en la zona y otro cuya ocurrencia es muy improbable. Se analiza de esta manera para observar cómo varían los métodos con la magnitud y aceleración de un sismo. En este análisis comparativo se encuentra que el método de Cetin et al. (2016) es el más confiable de utilizar, por ser el que considera más variables; mientras que el del Eurocódigo 8 – AENOR (2011) es el más práctico de usar al ser parte de una norma. Además, para sismos fuertes (factores de seguridad de licuación bajos) los métodos tienden a asemejarse para estratos licuables y las curvas basadas en el número de golpes N del ensayo SPT tienen la misma forma, a diferencia del método que emplea la velocidad de ondas de corte. La variabilidad de las propiedades del suelo utilizado, complican el análisis de resultados final en cuanto a la búsqueda de relaciones. Sin embargo, es posible obtener diferencias numéricas cuantificables y cualitativas entre cada uno de los métodos.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación	2
1.3 Alcance	3
1.4 Objetivos	3
1.5 Metodología	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA	5
2.1 Definición del fenómeno de licuación	5
2.2 Métodos de Análisis de Licuación de suelos	5
2.3 Método de R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014)	7
2.4 Método de Kayen R. et al. (2013)	10
2.5 Método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011)	12
2.6 Método de Cetin et al. (2016)	15
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	18
3.1 Caso de estudio	18
3.1.1 Número de golpes y número de golpes corregidos (N y N60)	19
3.1.2 Velocidad de ondas de corte (V_s)	19
3.1.3 Aceleración horizontal máxima del suelo ($a_{m\acute{a}x}$)	20
3.1.4 Magnitud del sismo (M_w)	21
3.1.5 Datos adicionales del EMS	21
3.2 Resultados de la evaluación del potencial de licuación	22
3.2.1 Resultados de R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014)	23
3.2.2 Resultados de Kanyen R. et al. (2013)	24
3.2.3 Resultados del Eurocódigo 8 – AENOR (2011)	25
3.2.4 Resultados de Cetin et al. (2016)	26
3.3 Discusión de resultados	27

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	32
4.1 Conclusiones	32
4.2 Recomendaciones	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el CRR y valores de $N_{1(60)}$ para sismos de magnitud igual a 7.5. (Eurocódigo, 2011)	14
Figura 2: Ubicación del lugar de estudio. Fuente: Google Earth.	18
Figura 3: Evaluación de potencial de licuación del caso 1	28
Figura 4: Evaluación de potencial de licuación del caso 2	28



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relación entre el CRR y valores de $N_{1(60)}$ para sismos de magnitud igual a 7.5. (Eurocódigo, 2011)	14
Tabla 2: Valores de N y N60 del suelo	19
Tabla 3: Valores de V_s del suelo	20
Tabla 4: Valores de $a_{m\acute{a}x}$	20
Tabla 5: Valores de M_w	21
Tabla 6: Datos adicionales del EMS	22
Tabla 7: Presiones por profundidad	22
Tabla 8: Resultados del caso 1 para R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014).....	23
Tabla 9: Resultados del caso 2 para R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014).....	23
Tabla 10: Resultados del caso 1 para Kanyen et al. (2013).....	24
Tabla 11: Resultados del caso 2 para Kanyen et al. (2013).....	24
Tabla 12: Resultados del caso 1 para el Eurocódigo 8 – AENOR (2011).....	25
Tabla 13: Resultados del caso 2 para el Eurocódigo 8 – AENOR (2011).....	25
Tabla 14: Resultados del caso 1 para Cetin et al. (2016).....	26
Tabla 15: Resultados del caso 2 para Cetin et al. (2016).....	26
Tabla 16: Resumen de FSL para el caso 1	27
Tabla 17: Resumen de FSL para el caso 2.....	27
Tabla 18: Comparación de parámetros	30

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

La masificación de la construcción de infraestructura para potenciar el desarrollo en el país ha generado un aumento en la demanda de ubicaciones con suelos adecuados para ubicar la cimentación de dichas edificaciones. El Perú cuenta con una gran variedad de tipos de suelos, de los cuales muchos no son recomendados para la construcción debido a su baja capacidad portante. Por ejemplo, en todo el litoral existe una presencia considerable de arenas mal gradadas, saturadas y con alto contenido de finos. Además, se tienen suelos sueltos o muy sueltos, los cuales tienden a ser más propensos a licuación. Así, ante la inminente manifestación de un sismo, considerando que existen zonas altamente sísmicas en el país, las infraestructuras construidas sobre este tipo de suelos serán las más propensas a tener mayores perjuicios, lo cual afecta la seguridad de las personas que las utilizan.

Es por ello que resulta imprescindible realizar un exhaustivo estudio de mecánica de suelos en los lugares en donde se planea construir; no solamente para determinar las propiedades mecánicas necesarias para el diseño de cimentaciones, sino que también lo será para conocer la existencia de posibles problemas debido al comportamiento del suelo cuando ocurra un sismo.

Uno de los fenómenos más importantes y complejos que presenta la ingeniería geotécnica, es la licuación de suelos. Este fenómeno, a lo largo de la historia, ha generado grandes pérdidas de vidas humanas y económicas. Por ejemplo, se presentó el fenómeno en departamentos costeros como Lima e Ica, debido al último sismo importante en el Perú ocurrido cerca de Pisco en el año 2007.

Para que se origine el fenómeno de licuación de suelos, que afecte notablemente a una edificación, deben cumplirse las siguientes tres condiciones en el terreno:

- El suelo debe ser susceptible a licuación (generalmente arenas sueltas)
- El nivel freático (NF) debe encontrarse a poca profundidad
- El terreno debe encontrarse en una zona sísmica

La licuación de suelos se genera por un aumento en la presión del agua en un suelo, producto de una fuerza externa, como la que ocasiona un sismo. Este aumento de presión separa las partículas de suelo, provocando que este se comporta como un líquido. Dicho de otro modo, al

aumentar la presión en el agua, disminuye la presión efectiva del suelo hasta que este ya no puede soportar las cargas externas actuantes.

El comportamiento sísmico de los suelos es un tema complejo debido a que influyen muchas variables. Sin embargo, es posible tener un conocimiento de la probabilidad de licuación de suelos en diferentes escenarios sísmicos a través de varios métodos. Estos pueden depender de datos obtenidos de ensayos in-situ como el número de golpes N del ensayo SPT, de la resistencia de cono del ensayo CPT, o de la velocidad de ondas de corte Vs.

Gracias a la variedad de métodos para evaluar la licuación de suelos, este estudio realiza una comparación de cuatro métodos modernos con metodologías distintas, para el cual se realizará un análisis de resultados para un suelo potencialmente licuable en el Perú.

1.2 Justificación

La importancia de esta investigación tiene como base a la creciente necesidad de cimentar sobre terrenos que no tienen condiciones geotécnicas buenas o recomendables. El panorama es desfavorable, pues el Perú se encuentra en un lugar con alto peligro sísmico. Por esta razón es necesario reducir la vulnerabilidad de las edificaciones, aplicando buenas prácticas de ingeniería en cada etapa de la construcción.

La norma E.050 “Suelos y Cimentaciones” del RNE, solicita al profesional responsable de cada proyecto incluir en el Estudio de Mecánica de Suelos un análisis determinístico o probabilístico del Potencial de Licuación del terreno en donde se va a cimentar e indicar la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, en caso se encuentre el proyecto sobre suelo susceptible.

Para ello es posible utilizar gran cantidad de métodos simplificados, desarrollados por cantidad de ingenieros investigadores a lo largo del tiempo y que son aplicados y recomendados en otras normas a nivel mundial. Estos, básicamente, *“comparan la resistencia cíclica del suelo a la licuación, obtenida mediante correlaciones con ensayos de campo, como el SPT, CPT o velocidad de onda de corte, con la sollicitación cíclica que se puede producir a causa de un evento sísmico”*. (Pastor, J. et al., 2018, p. 762)

Hacer un estudio comparativo de cuatro métodos para el análisis de licuación, se presenta como una oportunidad para cuantificar las diferencias en cuanto a: datos requeridos, metodología y resultados. Será posible, de la misma manera, comprobar que existen métodos más conservadores, y otros más prácticos. Finalmente, invita a la comunidad de ingenieros

peruanos, a realizar mayores estudios sobre la evaluación de licuación de suelos a través de métodos modernos en el territorio nacional.

1.3 Alcance

Se estudiarán 4 métodos de análisis de potencial de licuación de suelo: R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014), Kanyen R. et al (2013), Eurocódigo 8 – AENOR (2011), y Cetin et al. (2016). Se realizará una comparación entre: los datos requeridos, la metodología, y los resultados para un proyecto referencial con suelo susceptible a problemas por licuación ubicado en el Perú.

Los datos requeridos por cada método se podrán comparar de manera cualitativa, uniformizando la nomenclatura de cada una de las fórmulas, para discutir sobre la cantidad u omisión de variables necesarias por método, tales como: número de golpes N, velocidad de onda de corte Vs, profundidad del nivel freático, magnitud de sismo, contenido de finos, etc.

La metodología se comparará de manera cualitativa y cuantitativa, pues es en la diferencia de criterio para cada procedimiento para la obtención o corrección de algún dato, en donde se alteran los resultados finales.

Los resultados se deberán cuantificar para encontrar las diferencias entre: la probabilidad de licuación, los factores de seguridad frente a la ocurrencia de licuación, y la profundidad de licuación. De esta forma será posible discutir acerca de ventajas, desventajas, sobre qué método es más conservador, y sobre cuál es más práctico.

1.4 Objetivos

Objetivo general

- Comparar diferentes metodologías para evaluar el potencial de licuación de un suelo a partir de la información brindada por ensayos in situ.

Objetivos específicos

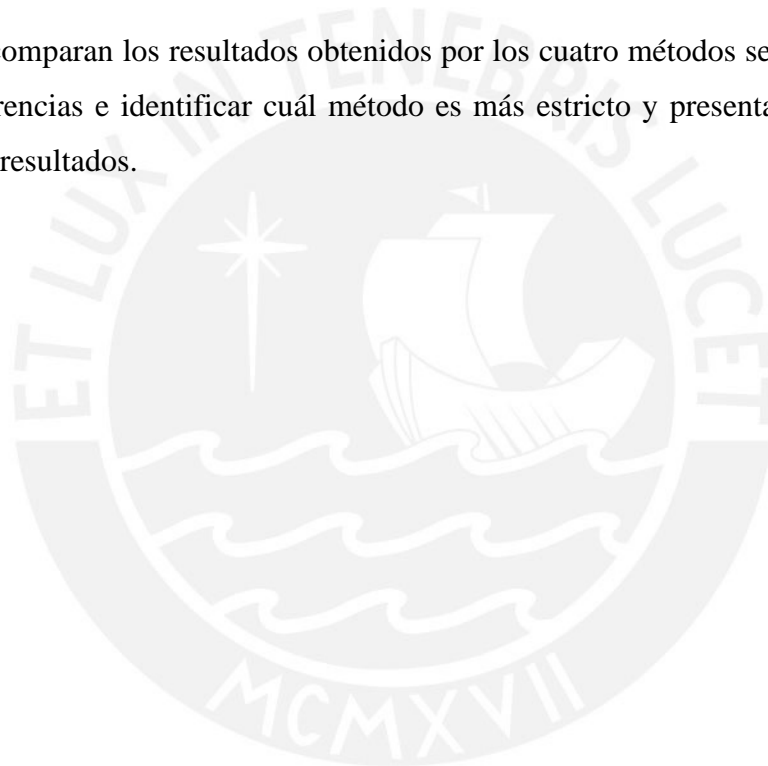
- Presentar los métodos de análisis de licuación de suelos utilizados
- Determinar la licuación de suelos según el método aplicado
- Comparar los resultados obtenidos de las metodologías empleadas para determinar la licuación de suelos

1.5 Metodología

El procedimiento a realizar en el presente trabajo de investigación consiste primero en revisar literatura no mayor a 10 años sobre métodos de análisis de licuación de suelos, diferenciándolos si son probabilísticos o determinísticos, donde se seleccionarán 4 métodos.

Posteriormente, se realizará una breve descripción del fenómeno de licuación, además de la descripción teórica de los métodos seleccionados. Consecuentemente, se procederá a buscar los datos necesarios para la aplicación de los métodos, basados en un estudio de mecánica de suelos de un determinado lugar, en este caso dentro de Perú. Después, se aplicarán las fórmulas de los métodos seleccionados para obtener el potencial de licuación.

Finalmente, se comparan los resultados obtenidos por los cuatro métodos seleccionados, para evaluar las diferencias e identificar cuál método es más estricto y presenta mayor grado de exactitud en los resultados.



CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA

En el presente capítulo, se definirá el fenómeno de licuación, como los efectos que tiene y la importancia de métodos para el análisis de este fenómeno. Posteriormente, se describirán los principales métodos seleccionados para el presente trabajo de investigación, donde se indicarán los pasos a seguir para el cálculo de los efectos de licuación.

2.1 Definición del fenómeno de licuación

Se conoce como licuación del suelo cuando el terreno presenta pérdida en la resistencia al corte debido a sollicitaciones de cargas monotónicas o cíclicas, y pasa de un estado sólido a líquido debido a la elevación de una alta presión de poros, lo que reduce la tensión efectiva de confinamiento a valores bajos o casi nulos. Los suelos que potencialmente tienden a ser licuables, son las arenas finas y poco densas, además de los limos con arena mal gradados. (Sladen, 1985)

Los fenómenos de licuación se clasifican como flujo por licuación o movilidad cíclica. Estas se diferencian por el estado inicial de tensiones actuantes en el terreno antes de la fuerza dinámica generada por el sismo.

La falla tipo flujo por licuación, se presentan cuando en el suelo existen esfuerzos de corte estáticos importantes previo al sismo; por ejemplo, en suelos bajo grandes edificaciones, muelles, puentes o muros de contención. Este tipo de falla, se genera por exceso de presiones de poros, pero ocurren desplazamientos de gran magnitud debido a las tensiones de corte estático.

La falla de licuación por movilidad cíclica, se presenta en suelos con esfuerzo de corte estático bajos, esta falla es generada por tensiones de corte sísmicas. Los desplazamientos son menores a las de fallas por flujo, y se requiere que la relación de presión de poros del suelo resulte valores cercanos a uno para la generación de desplazamientos.

2.2 Métodos de Análisis de Licuación de suelos

El fenómeno de licuación tiene efectos severos para la infraestructura y el terreno de su cimentación cuando se presenta. Según Rapti (2016), entre las consecuencias más importantes y conocidas se pueden encontrar las siguientes:

- Alteración del movimiento del suelo
- Desarrollo de volcanes de arena

- Asentamiento
- Inestabilidad del terreno

Evaluar el potencial de licuación del suelo, durante la ejecución de un estudio de mecánica de suelos, es importante para prevenir grandes pérdidas económicas y humanas ante la ocurrencia de este fenómeno. Por esa razón múltiples normas a nivel internacional, incluyendo las peruanas, obligan a los ingenieros proyectistas a utilizar métodos que permitan determinar cuando el suelo de la cimentación es propenso a sufrirlo.

La metodología para la evaluación del fenómeno de licuación consta de dos tipos de enfoques: procedimientos simplificados con base empírica y modelos basados en el comportamiento no lineal del suelo. (Rapti, 2016) Por practicidad se opta más por el primero, en donde se utilizan resultados de pruebas in situ, y en donde destaca a nivel mundial el método histórico propuesto por Seed e Idriss (1971), el cual utiliza los resultados obtenidos del ensayo de penetración estándar (SPT).

En la actualidad, se han presentado diferentes métodos para calcular el potencial de licuación de un suelo, siendo más precisos que el mencionado anteriormente al contar con mayor cantidad de datos de entrada y variables, como producto de la investigación constante.

Los métodos determinísticos evalúan el potencial de licuación del suelo a través del uso de factores de seguridad. Por lo general, cuando el valor de FSL es mayor a 1, significa que el suelo no es licuable, pero debido a la variabilidad asociada a los parámetros de cada modelo, este resultado no siempre brindará una adecuada confiabilidad, pero si lo suficiente como para tomar decisiones. (Jha et al., 2020)

Mientras tanto los métodos probabilísticos, explícitamente estudian la probabilidad de licuación del suelo bajo un enfoque de análisis de confiabilidad en donde se tiene en cuenta la incertidumbre asociada con diferentes parámetros de entrada. (Jha et al., 2020) Sirven también como un apoyo a los métodos determinísticos. De esta forma, la incertidumbre de cada variable dependiente dentro del cálculo es tomada en cuenta, y se incluyen diferentes tipos de análisis como el bayesiano.

En el presente proyecto de investigación, se optará por métodos probabilísticos y determinísticos que se basen en resultados de ensayos in situ, los cuales serían basados en los ensayos de penetración estándar (SPT) y velocidad de ondas de corte (Vs). La antigüedad de los métodos a aplicar será menor a 10 años de la fecha actual.

A continuación, se presenta la recopilación teórica de los métodos para la evaluación de licuación escogidos:

2.3 Método de R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014)

R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014) proponen un método determinístico considerando los datos del ensayo SPT y en base a su investigación previa, pero con una actualización a la base de datos histórica para casos de licuación.

Esfuerzo cortante cíclico (CSR)

En primer lugar, se utiliza la expresión propuesta por Seed e Idriss (1971) para determinar el esfuerzo cortante cíclico (CSR) a diferente profundidad “z”:

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * \frac{a_{m\acute{a}x}}{g} * r_d$$

Donde:

- σ_v es el esfuerzo total vertical a una profundidad “z”
- σ'_v es el esfuerzo efectivo vertical a una profundidad “z”
- $\frac{a_{m\acute{a}x}}{g}$ es la máxima aceleración horizontal de la superficie del suelo (como una fracción de la gravedad)
- r_d es el factor de reducción del esfuerzo cortante

El factor de reducción del esfuerzo cortante, varía dependiendo de la profundidad, y se calcula con las siguientes expresiones:

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z) * Mw)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 * \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 * \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right)$$

Donde:

- Mw es la magnitud del momento del sismo

Esfuerzo resistente cíclico (CRR)

Por otro lado, para determinar el esfuerzo resistente cíclico (CRR) se utilizarán los resultados del ensayo SPT con un respectivo tratamiento.

El número de golpes “N” debe multiplicarse por un factor de corrección (C) que representa el porcentaje de energía que realmente llega al terreno, y que es el producto de los factores de corrección por: eficiencia de martillo, longitud de barra, diámetro de perforación, y revestimiento interno del muestreador. El resultado es el valor de N_{60} , que es el número de golpes normalizado a una energía del 60% de la nominal.

$$N_{60} = N * C = N * C_E * C_R * C_B * C_S$$

Donde:

- C_E es el factor de eficiencia del martillo
- C_R es el factor de corrección por longitud de barra
- C_B es el factor de corrección por diámetro de perforación
- C_S es el factor de corrección por revestimiento interno del muestreador

En algunos métodos, el valor N_{60} deberá normalizarse por efecto de la presión atmosférica, obteniendo el valor de $(N_1)_{60}$ con la fórmula:

$$(N_1)_{60} = C_N * N_{60}$$

Donde:

- C_N es el factor de corrección de sobrecarga para normalizar el valor de N_{60} para un valor referencial igual a la presión atmosférica
- $(N_1)_{60}$ es la resistencia de penetración que se obtendría en una arena equivalente con un esfuerzo de sobrecarga de 1atm (presión atmosférica), con todos los atributos manteniéndose constantes

El contenido de finos en el suelo (CF) influye directamente en el valor de CRR. Por ello, se determina el valor de $(N_1)_{60cs}$ que considera dicha variable, con las siguientes fórmulas:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{CF + 0.01} - \left(\frac{15.7}{CF + 0.01}\right)^2\right)$$

Con el valor de $(N_1)_{60cs}$ se calcula el factor de corrección de sobrecarga C_N , necesario para determinar el valor de $(N_1)_{60}$:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.70$$

$$m = 0.784 - 0.0768 * \sqrt{(N_1)_{60cs}}$$

Donde:

- P_a es la presión atmosférica

Al ser necesario el valor $(N_1)_{60cs}$ y $(N_1)_{60}$ para determinar los valores del otro, habrán dos ecuaciones para dos variables, por lo que será necesario realizar un proceso iterativo para determinar ambos.

Con el valor de $(N_1)_{60cs}$, se determina otro factor de corrección de sobrecarga K_σ con las siguientes fórmulas:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma * \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.10$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 * \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.30$$

Posteriormente, se calculan los valores de $CRR_{Mw=7.5, \sigma'_v=1}$, para un sismo referencial de magnitud de 7.5 y con σ'_v igual a 1 atm, con $(N_1)_{60cs}$ aplicando la siguiente expresión:

$$CRR_{Mw=7.5, \sigma'_v=1 atm} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right)$$

Los valores de CRR del suelo dependen de la duración del sismo, expresada a través de un factor de escala de magnitud MSF, y del esfuerzo de sobrecarga, expresado mediante el segundo factor encontrado K_σ . Se utilizará la siguiente fórmula, para determinar el CRR a la presión efectiva y magnitud de sismo reales:

$$CRR = CRR_{Mw=7.5, \sigma'_v=1 atm} * MSF * K_\sigma$$

El factor MSF se calcula como:

$$MSF = 1 + (MSF_{m\acute{a}x} - 1) * (8.64 * \exp\left(\frac{-Mw}{4}\right) - 1.325)$$

Donde:

- $MSF_{m\acute{a}x}$ es igual a 1.80 para arenas, y 1.09 para arcilla y limo plástico

Finalmente, se comparan los valores ajustados de CRR y CSR para poder evaluar el potencial de licuación del suelo a una profundidad “z”. El factor de seguridad se determina como:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR}$$

En donde habrá licuación para valores menores a 1.

2.4 Método de Kayen R. et al. (2013)

Kayen R., et al. (2013) promueve en su método determinístico y probabilístico el uso de mediciones de la velocidad de onda de corte (V_s) para determinar la resistencia cíclica del suelo a la licuación. El método estima e incluye la incertidumbre de las variables que comprenden la demanda sísmica y la capacidad del suelo. Asimismo, el análisis probabilístico también ayuda a resolver los problemas auxiliares del contenido de finos y factores de escala de magnitud.

En primer lugar, se plantea la relación entre la velocidad de ondas de corte (V_s) tomada in situ con el módulo de corte no perturbado (G_{max}) y la densidad de masa del suelo (ρ).

$$V_s = \left(\frac{G_{max}}{\rho} \right)^{0.5}$$

La V_s de campo es corregida, multiplicándola por un factor de corrección del esfuerzo vertical (C_{Vs}) y así teniendo:

$$V_{s1} = V_s C_{Vs} = V_s \left(\frac{p_a}{\sigma_v} \right)^{0.25}$$

Donde:

- C_{Vs} es el factor de corrección del esfuerzo vertical. El valor máximo es 1.5 que generalmente es aplicado a datos de velocidad de ondas de corte a poca profundidad
- P_a es la presión atmosférica
- σ'_v es el esfuerzo efectivo vertical a una profundidad “z”

Esfuerzo cortante cíclico (CSR)

El esfuerzo cortante cíclico (CSR) se determina con la expresión simplificada de Seed e Idriss (1971), al igual que en el método de R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014), y con la misma nomenclatura.

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * \frac{a_{máx}}{g} * r_d$$

El parámetro r_d se determina en base al modelo estadístico de los resultados del análisis de respuesta del suelo de Cetin et al. (2016), que se muestra en el numeral 2.6 del presente trabajo de investigación.

Al valor hallado de CSR se le aplica un factor de ponderación de duración del terremoto o factor de escala de magnitud MSF. El ajuste de CSR a CSR* se realiza escalando el valor inicial para compensar la duración más larga o más corta de la agitación en relación con un evento de magnitud $M_w = 7.5$ equivalente.

$$MSF = 15 * M_w^{-1.342}$$

$$CSR^* = CSR_{M_w=7.5, \sigma'_v=1 atm} = \frac{CSR}{MSF * K_\sigma}$$

La actualización bayesiana, que proporciona el marco probabilístico para los modelos que mejor se adaptan a la frontera límite que distingue las regiones de alta y baja probabilidad de ocurrencia de licuación. En la presente investigación, la distribución normal acumulada (Φ) se utiliza para calcular la probabilidad de licuefacción (PL). Este análisis conlleva a formar una función de verosimilitud, seleccionar una distribución previa no informativa, calcular una constante de normalización y luego calcular las estadísticas posteriores.

$$P_L = \Phi * \left(\frac{(0.0073 * V_{S1})^{2.8011} - 1.946 * \ln(CSR) - 2.6168 * \ln(M_w) - 0.0099 * \ln(\sigma'_v) + 0.0028 * (CF)}{0.4809} \right)$$

Donde:

- CF es el contenido de finos.

Esfuerzo resistente cíclico (CRR)

La capacidad del suelo para resistir la licuación (CRR) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(0.0073 * V_{S1})^{2.8011} - 2.6168 * \ln(M_w) - 0.0099 * \ln(\sigma'_v) + 0.0028 * CF + 0.4809 * \Phi^{-1} * (P_L)}{1.946} \right\}$$

Finalmente, el factor de seguridad contra la activación de la licuación del suelo se calcula como la relación de CRR y la correspondencia sísmica escalada (CSR*).

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR^*} \geq 1$$

2.5 Método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011)

La norma europea EN 1998-5 2011 - Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 5: Cimentaciones, estructuras de contención y aspectos geotécnicos, propone su método determinístico en base a la comparación entre el esfuerzo cortante normalizado inducido por el sismo (CSR) con el de resistencia del suelo (CRR), haciendo uso de los resultados del ensayo SPT.

Se indica que se realizará el análisis del potencial de licuación cuando los suelos de la cimentación están conformados por arenas sueltas, con o sin finos (limo o arcilla), debajo del nivel freático o cuando este se encuentra muy cerca de la superficie del suelo.

Para cimentaciones poco profundas, puede omitirse el análisis cuando los suelos arenosos saturados se encuentran a profundidades mayores a 15 m desde la superficie del terreno. También cuando se cumpla que $\alpha * S < 0.15$.

Donde:

- S es un coeficiente dependiente del tipo de suelo (según adecuación de acuerdo al AENOR)
- α es la relación entre la aceleración del terreno de diseño en el tipo de terreno tipo A (según AENOR) (roca o formación geológica similar con velocidad media de la onda de corte superior a 800 m/s), (a_g) y la aceleración de la gravedad g

Y por lo menos se cumpla una de las siguientes condiciones:

- a. El contenido de arcillas en la arena es mayor del 20% con un índice de plasticidad (IP) mayor de 10.
- b. El contenido de limos en la arena es superior al 35% y el número de golpes SPT normalizado $N_{1(60)}$ es mayor de 20.
- c. La arena es limpia con un número de golpes SPT normalizado $N_{1(60)}$ mayor de 30.

Gracias a la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), el Eurocódigo puede desarrollarse de la siguiente manera, con las adecuaciones convenientes.

Esfuerzo cortante cíclico (CSR)

A diferencia de los dos métodos anteriores, se estima el valor de CSR con la expresión simplificada de Seed e Idriss (1971), pero sin considerar un factor de reducción de esfuerzo cortante o factor de participación de masa de corte no lineal (r_d). Esta fórmula es válida para profundidades (z) menores a 20 m.

$$CSR = 0.65 * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} * \frac{a_{m\acute{a}x}}{g}$$

Esfuerzo resistente cíclico (CRR)

El valor de CRR, se calcula de manera directa del gráfico 1 considerando el contenido de finos. Para ello, se debe corregir el valor de N del ensayo SPT, haciendo las correcciones correspondientes, igual que en el método de R.W. Boulanger e I. M. Idriss (2014) (se utiliza la misma nomenclatura). Además, para profundidades (z) menores a 3 m los valores medidos de N deberán reducirse en un 25%.

$$N_{60} = N * C$$

$$N_{1(60)} = N_{60} * C_N = N_{60} * \left(\frac{Pa}{\sigma'_v}\right)^{0.5}$$

Asimismo, el factor C_N debe cumplir que:

$$0.50 \leq \left(\frac{Pa}{\sigma'_v}\right)^{0.5} \leq 2.00$$

El valor de CRR será el que corresponde para un sismo equivalente de magnitud $M_w = 7.5$.

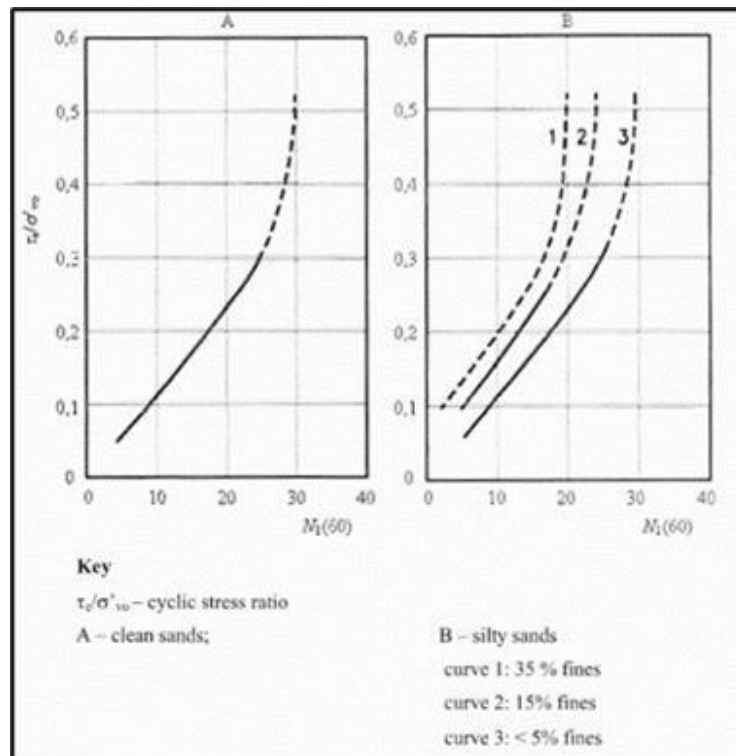


Figura 1: Relación entre el CRR y valores de $N_{1(60)}$ para sismos de magnitud igual a 7.5. (Eurocódigo, 2011)

Para sismos con magnitudes diferentes a 7.5, los valores de las ordenadas de las curvas deben multiplicarse por los siguientes coeficientes MSF:

Tabla 1: Relación entre el CRR y valores de $N_{1(60)}$ para sismos de magnitud igual a 7.5. (Eurocódigo, 2011)

M_w	MSF
5.5	2.86
6.0	2.20
6.5	1.69
7.0	1.30
8.0	0.67

Por lo tanto, el valor del esfuerzo resistente cortante, para la magnitud de sismo correspondiente al caso de estudio será:

$$CRR = MSF * CRR_{M_w=7.5}$$

Finalmente, el valor de FS se obtiene como el cociente de CRR, corregido para la magnitud de sismo escogida, entre CSR.

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR}$$

2.6 Método de Cetin et al. (2016)

El método propuesto por Cetin et al. (2016), fue realizado luego de analizar numerosos casos de licuación de suelos y está basado en metodologías previas, de las cuales entre algunos de sus autores se encuentran Seed, Cetin, Boulanger e Idriss. Al igual que las predecesoras, tiene como objetivo determinar un esfuerzo cortante normalizado inducido por el sismo (CSR) y una relación de resistencia crítica (CRR).

Esfuerzo cortante cíclico (CSR)

Uno de los motivos de cambiar la estimación del CSR es el error encontrado en el cálculo del factor de reducción de esfuerzo cortante o factor de participación de masa de corte no lineal (r_d). Se encontró que este dependía de la distancia de la superficie al estrato de análisis (d), la magnitud del sismo (M_w), la aceleración máxima inducida por el sismo ($a_{máx}$) y la velocidad de ondas de corte promedio sobre los 12 metros ($V_{s,12m}^*$). Debido a que las expresiones son el resultado de varias investigaciones, se incorpora una desviación estándar; sin embargo, para fines prácticos, se omitirá. Asimismo, debido a que los datos procesados son de menos de 20 m de profundidad, solo se considerará la expresión de r_d para este tramo. De esta manera el CSR se calcula con la expresión simplificada de Seed e Idriss (1971), al igual que en los métodos anteriores:

$$CSR = 0.65 * \frac{a_{máx}}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma_v^F} * r_d$$

$$r_d = \frac{1 + \frac{-23.013 - 2.949 * a_{máx} + 0.999 * M_w + 0.0525 * V_{s,12m}^*}{162.58 + 0.201 * e^{0.341 * (-d + 0.0785 * V_{s,12m}^* + 7.586)}}}{1 + \frac{-23.013 - 2.949 * a_{máx} + 0.999 * M_w + 0.0525 * V_{s,12m}^*}{162.58 + 0.201 * e^{0.341 * (0.0785 * V_{s,12m}^* + 7.586)}}} - 0.0046 * (d - 20)$$

Esfuerzo resistente cíclico (CRR)

Para el cálculo de CRR, primero, se presentan variaciones respecto al factor C_N y a la corrección por contenido de finos $\Delta(N_1)_{60}$, los cuales afectan al número de golpes que provee el ensayo SPT. Para el cálculo de $\Delta(N_1)_{60}$, se emplea el contenido de finos en porcentaje (CF) y siete coeficientes de modelo obtenidos a partir del análisis del estudio: $\theta_1 = 0.00167$, $\theta_2 = 27.352$, $\theta_3 = 3.958$, $\theta_4 = 0.089$, $\theta_5 = 16.084$, $\theta_6 = 11.171$, $\theta_7 = 0.392$ y $\sigma_\varepsilon = 2.95$. El procedimiento es similar a los métodos anteriores (utiliza la misma nomenclatura).

$$N_1 = N * C_N$$

$$C_N = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{0.5} \leq 2.0$$

$$(N_1)_{60} = N_1 * C$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

$$\Delta(N_1)_{60} = CF * (\theta 1 * (N_1)_{60} + \theta 4)$$

Adicionalmente, para la estimación de CRR , se emplea el potencial de licuación (P_L). Nótese que el cálculo es para $M_w = 7.5$ (aplica también para M_w del CSR). Consecuentemente, CRR se obtiene de la siguiente manera:

$$CRR = \exp \left[\frac{((N_1)_{60} * (1 + \theta 1 * CF) - \theta 2 * \ln(M_w) - \theta 3 * \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + \theta 4 * CF + \theta 5 + \sigma \varepsilon * \Phi^{-1}(PL))}{\theta 6} \right]$$

donde

$$PL = \Phi \left[- \frac{((N_1)_{60} * (1 + \theta 1 * CF) - \theta 6 * \ln(CSR) - \theta 2 * \ln(M_w) - \theta 3 * \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + \theta 4 * CF + \theta 5)}{\sigma \varepsilon} \right]$$

Hasta este punto, se tiene todo, excepto un dato: el CSR para $M_w = 7.5$. Esto se consigue mediante dos correcciones (K_σ y K_{M_w}).

$$CSR_{M_w=7.5} = CSR_{M_w} * \frac{1}{K_\sigma} * \frac{1}{K_{M_w}}$$

donde

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right)^{-0.3/0.6}; \text{ lím.: } 0.8 \leq K_\sigma \leq 1.6$$

$$K_{M_w} = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-0.2/0.6}; \text{ lím.: } 5.5 \leq M_w \leq 8.4$$

Nota: existe una corrección adicional omitida por fines prácticos ($\alpha=0$) y Φ es la distribución normal con media igual a 0 y desviación estándar igual a 1.

Factor de seguridad de licuación (FSL)

A diferencia de otros métodos, el FS se obtiene a partir del potencial de licuación. Se puede calcular para cualquier valor de potencial de licuación; sin embargo, para el método se emplea 50% para una evaluación determinística:

$$FS_i = \exp[-0.251 * \Phi^{-1}(PL)]$$



CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se mencionará a detalle los parámetros del suelo del caso de estudio, se realizará el análisis de licuación con los métodos descritos en el capítulo anterior, y se comentará y describirá los resultados claves obtenidos durante este trabajo.

3.1 Caso de estudio

El suelo empleado en la investigación, se encuentra localizado en la ciudad de Juliaca, departamento de Puno, en el Perú, específicamente en las coordenadas (UTM 19L 381897.20 m E 8290154.10 m N). Los datos corresponden al estudio realizado por Alata y Zevillanos (2021).

En el terreno del lugar de estudio, se identificó que el nivel freático se encontraba a los 3 metros de profundidad. Además sobre el nivel freático se encontraron dos tipos de suelos, según la clasificación de suelos SUCS, los cuales son SW y SM y bajo el nivel freático se encontró que de profundidad de 3 a 4 metros el estrato se clasificaba como arena mal gradada con limo (SP-SM), de 4 a 8 metros se encontraba limo de alta plasticidad (MH), de 8 a 14 metros otra vez arena mal gradada con limo (SP-SM) y de 14 a 16 metros arena bien gradada con limo (SW-SM).



Figura 2: Ubicación del lugar de estudio. Fuente: Google Earth.

Los métodos de análisis de licuación mencionados en el acápite anterior, necesitan de parámetros definidos, los cuales son el número de golpes (N), la velocidad de ondas de corte (V_s), aceleración máxima ($a_{m\acute{a}x}$) y la magnitud de momento del sismo (M_w).

3.1.1 Número de golpes y número de golpes corregidos (N y N60)

Del ensayo SPT se obtuvieron los siguientes valores de los números de golpes para cada profundidad del estrato, a cada uno de estos se le multiplicaron con los siguientes factores de corrección por: eficiencia del martillo ($C_E = 0.72$), longitud de barra ($C_R = 0.75$ a 0.95), revestimiento interno del muestreador ($C_S = 1$), y diámetro de perforación ($C_B = 1$). El resultado final es el valor N_{60} o número de golpes normalizado a una energía del 60% de la nominal.

$$N_{60} = N * C = N * C_E * C_R * C_B * C_S$$

No se ejecutará análisis de licuación ni en estratos sobre el nivel freático (3 m), ni en los tres estratos correspondientes al limo de alta plasticidad MH.

Tabla 2: Valores de N y N60 del suelo

PROFUNDIDAD (m)	PROF. + 0.30 (m)	SUCS	N	C_E	C_R	C_S	C_B	N60
1.00	1.30	SW-SM	4	0.72	0.75	1	1	2
2.00	2.30	SM	5	0.72	0.75	1	1	3
3.00	3.30	SP-SM	4	0.72	0.8	1	1	2
4.00	4.30	MH	6	0.72	0.85	1	1	4
5.00	5.30	MH	8	0.72	0.85	1	1	5
6.00	6.30	MH	5	0.72	0.95	1	1	3
7.00	7.30	SP-SM	25	0.72	0.95	1	1	17
8.00	8.30	SP-SM	26	0.72	0.95	1	1	18
9.00	9.30	SP-SM	17	0.72	0.95	1	1	12
10.00	10.30	SP-SM	27	0.72	0.95	1	1	18
11.00	11.30	SP-SM	28	0.72	0.95	1	1	19
12.00	12.30	SP-SM	17	0.72	0.95	1	1	12
13.00	13.30	SP-SM	22	0.72	0.95	1	1	15
14.00	14.30	SW-SM	28	0.72	0.95	1	1	19
15.00	15.30	SW-SM	44	0.72	0.95	1	1	30
16.00	16.30	SM	60	0.72	0.95	1	1	41

3.1.2 Velocidad de ondas de corte (V_s)

En el suelo seleccionado para el estudio se realizaron ensayos MASW, para obtener las velocidades de ondas de corte en función a la profundidad de los estratos como se puede apreciar en el siguiente cuadro.

Tabla 3: Valores de V_s del suelo

PROFUNDIDAD (m)	PROF. + 0.30 (m)	V_s (m/s)
1.00	1.30	78.2
2.00	2.30	81.2
3.00	3.30	87.9
4.00	4.30	87.8
5.00	5.30	107.3
6.00	6.30	107.2
7.00	7.30	132.7
8.00	8.30	149.3
9.00	9.30	149.3
10.00	10.30	149.3
11.00	11.30	162.3
12.00	12.30	162.3
13.00	13.30	172.9
14.00	14.30	172.9
15.00	15.30	182.5
16.00	16.30	182.5

3.1.3 Aceleración horizontal máxima del suelo ($a_{m\acute{a}x}$)

La aceleración horizontal máxima del suelo ($a_{m\acute{a}x}$) se obtiene a partir del mapa de aceleraciones máximas normalizadas para un período de retorno definido en suelo rígido.

Para este trabajo ha sido tomado en consideración, para el primer cálculo de valores, el mapa del estudio publicado por el Instituto Geofísico del Perú en el 2014 para un período de retorno de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10%. En Juliaca, Puno, la aceleración máxima del suelo es aproximadamente 0.20 g.

Para el segundo cálculo, se ha decidido utilizar una $a_{m\acute{a}x}$ igual a 0.45 g. El valor no corresponde a un dato real del lugar de caso de estudio, pero se ha decidido utilizar valores altos para hacer una comparación entre los resultados con fines académicos.

Tabla 4: Valores de $a_{m\acute{a}x}$

Caso de cálculo	$a_{m\acute{a}x}$
1	0.20 g
2	0.45 g

3.1.4 Magnitud del sismo (M_w)

La magnitud del sismo (M_w) identifica la cantidad de energía liberada durante un movimiento sísmico. Para la ciudad de Juliaca los sismos pasados registrados a su alrededor, según el mapa del estudio del Instituto Geofísico del Perú publicado en 2016, han sido en su mayoría de profundidad intermedia (61 – 300 km de profundidad), y de magnitudes mayores o iguales a 6.

Para el primer caso de cálculo de esta investigación, se está proponiendo un evento sísmico de magnitud M_w igual a 6.5. Siguiendo la razón de que en cualquier lugar en donde han ocurrido terremotos en un pasado, deberán repetirse en un futuro con igual o mayor intensidad.

Por su parte, para el segundo cálculo se decidió utilizar un sismo de magnitud M_w igual a 8. Siendo un evento con muy poca probabilidad de ocurrencia, para poder comparar los métodos de licuación.

Tabla 5: *Valores de M_w*

Caso de cálculo	M_w
1	6.00
2	8.00

3.1.5 Datos adicionales del EMS

En el suelo seleccionado para el estudio, se recolectaron datos sobre el porcentaje de humedad (%w), la granulometría (donde se puede apreciar el %finos, el %arena y el %grava) y peso específico de cada estrato, necesarios para el desarrollo de los métodos seleccionados, por lo que el resumen de estos datos se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 6: Datos adicionales del EMS

PROFUNDIDAD (m)	w%	%finos	%arena	%grava	Y (g/cm³)
1.00	38.1	10.7	89.3	0	1.6
2.00	26.29	23	77	0	1.62
3.00	24.22	9.8	89.5	0.7	1.6
4.00	63.68	96	4	0	3.15
5.00	64.24	93.6	6.4	0	3.15
6.00	59.96	96.7	3.3	0	3.15
7.00	16.36	8.4	68.3	23.3	1.99
8.00	12.33	5.8	80.3	13.9	1.99
9.00	12.76	5.2	80.8	14	1.86
10.00	13.35	5.8	80.3	13.9	2.01
11.00	11.87	5.6	80.5	13.9	2.02
12.00	11.84	5.6	80.5	13.9	1.78
13.00	11.69	5.7	80.4	13.9	1.93
14.00	13.7	9.7	76.8	13.5	2.01
15.00	14.46	11.2	80.8	8	2.12
16.00	15.88	14.4	79.1	6.5	2.4

3.2 Resultados de la evaluación del potencial de licuación

Se realizó un total de dos casos de cálculo para la evaluación del potencial de licuación del suelo. El primer caso de cálculo corresponde al de una situación real, con un valor de $a_{m\acute{a}x}$ y magnitud de sismo recurrente en la zona del caso de estudio. Mientras que el segundo caso, evalúa un evento sísmico fuera de lo común. Antes de empezar con los cálculos particulares de cada método, es importante obtener las presiones (esfuerzos verticales totales y efectivos) en cada nivel a evaluar. Estas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7: Presiones por profundidad

Prof. Análisis	σ_{0v} (kPa)	σ'_{0v} (kPa)
3.3	52	49
7.3	163	121
8.3	183	131
9.3	201	140
10.3	221	149
11.3	241	159
12.3	259	167
13.3	277	176
14.3	297	186
15.3	317	197
16.3	340	210

3.2.1 Resultados de R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014)

Los resultados del método de R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014) fueron los siguientes:

Tabla 8: Resultados del caso 1 para R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014)

Prof.												
Análisis	rd	N1(60)	ΔN60	CN	N1(60) CS	CRR7.5	CSR	Cσ	Kσ	CRRM	FSL	
(m)												
3.3	0.7	3.54	1.06	1.54	4.6	0.08	0.1	0.07	1.02	0.11	1.16	
7.3	0.7	15.45	0.5	0.90	15.95	0.16	0.12	0.11	0.99	0.21	1.73	
8.3	0.7	15.47	0.02	0.87	15.49	0.16	0.13	0.11	0.99	0.21	1.62	
9.3	0.7	9.59	0	0.82	9.59	0.12	0.13	0.09	0.99	0.15	1.13	
10.3	0.7	15.06	0.02	0.82	15.08	0.16	0.13	0.11	0.98	0.2	1.49	
11.3	0.7	15.14	0.01	0.79	15.15	0.16	0.14	0.11	0.98	0.2	1.46	
12.3	0.7	8.63	0.01	0.74	8.64	0.11	0.14	0.09	0.98	0.14	0.99	
13.3	0.7	11.04	0.01	0.73	11.06	0.13	0.14	0.1	0.98	0.16	1.12	
14.3	0.7	14.03	1.01	0.73	15.05	0.16	0.14	0.11	0.97	0.2	1.37	
15.3	0.7	22.71	1.71	0.75	24.42	0.28	0.15	0.16	0.95	0.34	2.35	
16.3	0.7	31.93	3.05	0.78	34.99	1.11	0.15	0.26	0.91	1.31	8.96	

Tabla 9: Resultados del caso 2 para R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014)

Prof.												
Análisis	rd	N1(60)	ΔN60	CN	N1(60) CS	CRR7.5	CSR	Cσ	Kσ	CRRM	FSL	
(m)												
3.3	0.83	3.54	1.06	1.54	4.6	0.08	0.26	0.07	1.02	0.08	0.29	
7.3	0.83	15.45	0.5	0.9	15.95	0.16	0.33	0.11	0.99	0.14	0.43	
8.3	0.83	15.47	0.02	0.87	15.49	0.16	0.34	0.11	0.99	0.14	0.41	
9.3	0.83	9.59	0	0.82	9.59	0.12	0.35	0.09	0.99	0.1	0.28	
10.3	0.83	15.06	0.02	0.82	15.08	0.16	0.36	0.11	0.98	0.13	0.37	
11.3	0.83	15.14	0.01	0.79	15.15	0.16	0.37	0.11	0.98	0.13	0.37	
12.3	0.83	8.63	0.01	0.74	8.64	0.11	0.38	0.09	0.98	0.09	0.25	
13.3	0.83	11.04	0.01	0.73	11.06	0.13	0.38	0.1	0.98	0.11	0.28	
14.3	0.83	14.03	1.01	0.73	15.05	0.16	0.39	0.11	0.97	0.13	0.34	
15.3	0.83	22.71	1.71	0.75	24.42	0.28	0.39	0.16	0.95	0.23	0.59	
16.3	0.83	31.93	3.05	0.78	34.99	1.11	0.39	0.26	0.91	0.88	2.24	

Como se puede apreciar en la primera tabla, el suelo estudiado no licúa en la mayoría de las profundidades de análisis, a excepción de la profundidad 12.30 m, donde el factor de seguridad de licuación es 0.99. Además, el valor de MSF fue de 1.301, y de MSF0 de 1.049.

En el segundo caso, el suelo licúa en casi toda la profundidad de análisis, excepto en 16.30 m, donde el factor de seguridad de licuación es 2.24. Asimismo, el valor de MSF fue de 0.875, y de MSF0 de 0.980.

3.2.2 Resultados de Kanyen R. et al. (2013)

Los resultados del método de Kanyen R. et al. (2013) fueron los siguientes:

Tabla 10: Resultados del caso 1 para Kanyen et al. (2013)

Prof. Análisis (m)	rd	CSR Mw	$K\sigma$	CSR* Mw=7.5	Vs1 m/s	CRR Mw = 7.5	FSL
3.3	0.80	0.11	1.28	0.10	105.39	0.10	1.39
7.3	0.55	0.10	0.94	0.13	126.88	0.16	1.86
8.3	0.50	0.09	0.92	0.13	140.03	0.21	2.58
9.3	0.47	0.09	0.90	0.13	137.80	0.21	2.59
10.3	0.44	0.09	0.88	0.13	135.53	0.21	2.58
11.3	0.42	0.08	0.86	0.13	144.96	0.26	3.26
12.3	0.41	0.08	0.84	0.13	143.17	0.25	3.16
13.3	0.40	0.08	0.83	0.14	150.57	0.30	3.77
14.3	0.39	0.08	0.82	0.14	148.56	0.29	3.56
15.3	0.38	0.08	0.80	0.14	154.61	0.34	4.11
16.3	0.38	0.08	0.80	0.14	152.13	0.32	3.89

Tabla 11: Resultados del caso 2 para Kanyen et al. (2013)

Prof. Análisis (m)	rd	CSR Mw	$K\sigma$	CSR* Mw=7.5	Vs1 m/s	CRR Mw = 7.5	FSL
3.3	0.81	0.25	1.28	0.21	105.39	0.02	0.11
7.3	0.58	0.23	0.94	0.27	126.88	0.04	0.14
8.3	0.54	0.22	0.92	0.26	140.03	0.05	0.19
9.3	0.51	0.22	0.90	0.26	137.80	0.05	0.19
10.3	0.49	0.21	0.88	0.26	135.53	0.05	0.18
11.3	0.47	0.21	0.86	0.26	144.96	0.06	0.23
12.3	0.46	0.21	0.84	0.26	143.17	0.06	0.22
13.3	0.45	0.21	0.83	0.27	150.57	0.07	0.26
14.3	0.44	0.20	0.82	0.27	148.56	0.07	0.24
15.3	0.43	0.20	0.80	0.28	154.61	0.08	0.28
16.3	0.43	0.20	0.80	0.28	152.13	0.07	0.26

Para el primer caso, se indica que ningún estrato de suelo licua por tener un FSL mayor a 1. Asimismo, el valor de MSF es de 1.217. Para el segundo, el resultado indica que todos los estratos de suelo licuan por tener un FS menor a 1. Asimismo, el valor de MSF es de 0.921.

3.2.3 Resultados del Eurocódigo 8 – AENOR (2011)

Para el método del Eurocódigo, se obtuvieron los siguientes resultados por cada caso:

Tabla 12: Resultados del caso 1 para el Eurocódigo 8 – AENOR (2011)

Prof. Análisis (m)	CN	N1 60	CSR	CRR 7.5	CRR	FSL
3.30	1.428	3.29	0.138	0.056	0.095	0.69
7.30	0.908	15.53	0.175	0.168	0.284	1.62
8.30	0.874	15.54	0.182	0.168	0.284	1.56
9.30	0.846	9.84	0.188	0.107	0.181	0.96
10.30	0.819	15.12	0.192	0.163	0.276	1.44
11.30	0.793	15.18	0.196	0.164	0.277	1.41
12.30	0.773	8.99	0.201	0.098	0.166	0.83
13.30	0.753	11.34	0.205	0.123	0.207	1.01
14.30	0.733	14.05	0.207	0.152	0.257	1.24
15.30	0.713	21.46	0.210	0.233	0.394	1.88
16.30	0.690	28.33	0.211	0.352	0.595	2.82

Tabla 13: Resultados del caso 2 para el Eurocódigo 8 – AENOR (2011)

Prof. Análisis (m)	CN	N1 60	CSR	CRR 7.5	CRR	FSL
3.30	1.428	3.29	0.310	0.056	0.038	0.12
7.30	0.908	15.53	0.394	0.168	0.112	0.29
8.30	0.874	15.54	0.409	0.168	0.113	0.28
9.30	0.846	9.84	0.422	0.107	0.072	0.17
10.30	0.819	15.12	0.433	0.163	0.110	0.25
11.30	0.793	15.18	0.442	0.164	0.110	0.25
12.30	0.773	8.99	0.452	0.098	0.066	0.15
13.30	0.753	11.34	0.460	0.123	0.082	0.18
14.30	0.733	14.05	0.467	0.152	0.102	0.22
15.30	0.713	21.46	0.472	0.233	0.156	0.33
16.30	0.690	28.33	0.474	0.352	0.236	0.50

Los resultados para el primer caso de cálculo indican un FSL por debajo de 1.00, es decir que se presenta potencial de licuación, en los estratos con profundidad de análisis: 9.30 m, 12.30 m. Además, el valor de MSF utilizado fue de 1.69, para el sismo de $M_w = 6.00$.

Los resultados para el segundo caso de cálculo indican un FSL por debajo de 1.00 para todos los estratos evaluados, es decir, que el suelo licua en toda la profundidad analizada. Además, el valor de MSF utilizado fue de 0.67, para el sismo de $M_w = 8.00$.

3.2.4 Resultados de Cetin et al. (2016)

Para este método, se empleó el peso específico del suelo y los valores de velocidad de onda de corte hasta los 12 metros. Con estos últimos, se calcula el valor de $V_{s,12m}^*$, el cual resulta de 112.46 m/s. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 14: Resultados del caso 1 para Cetin et al. (2016)

Prof. Análisis	rd	CSR		CSR Mw=7.5	(N1) CN	N1,60, 60	N1,60, CS	PL	FSL (50%)
		Mw	$K\sigma$						
3.3	0.78	0.11	1.28	0.05	1.44	3.3	4.2	24%	1.19
7.3	0.52	0.09	0.94	0.06	0.91	15.6	16.6	0%	2.19
8.3	0.48	0.09	0.92	0.06	0.88	15.6	16.3	0%	2.19
9.3	0.44	0.08	0.90	0.06	0.85	9.9	10.5	12%	1.35
10.3	0.41	0.08	0.88	0.06	0.82	15.2	15.9	0%	2.11
11.3	0.39	0.08	0.86	0.05	0.80	15.3	15.9	0%	2.10
12.3	0.38	0.08	0.84	0.05	0.78	9.0	9.6	22%	1.22
13.3	0.37	0.07	0.83	0.05	0.76	11.4	12.0	7%	1.45
14.3	0.36	0.07	0.82	0.06	0.74	14.1	15.2	1%	1.79
15.3	0.35	0.07	0.80	0.06	0.72	21.6	23.0	0%	3.26
16.3	0.35	0.07	0.80	0.06	0.69	28.5	30.5	0%	5.80

Tabla 15: Resultados del caso 2 para Cetin et al. (2016)

Prof. Análisis	rd	CSR		CSR Mw=7.5	(N1) CN	N1,60, 60	N1,60, CS	PL	FSL (50%)
		Mw	$K\sigma$						
3.3	0.81	0.25	1.28	0.23	1.44	3.3	4.2	100%	0.27
7.3	0.58	0.23	0.94	0.28	0.91	15.6	16.6	100%	0.46
8.3	0.54	0.22	0.92	0.28	0.88	15.6	16.3	100%	0.45
9.3	0.51	0.22	0.90	0.28	0.85	9.9	10.5	100%	0.27
10.3	0.49	0.21	0.88	0.28	0.82	15.2	15.9	100%	0.42
11.3	0.47	0.21	0.86	0.28	0.80	15.3	15.9	100%	0.41
12.3	0.46	0.21	0.84	0.28	0.78	9.0	9.6	100%	0.23
13.3	0.45	0.21	0.83	0.29	0.76	11.4	12.0	100%	0.28
14.3	0.44	0.20	0.82	0.29	0.74	14.1	15.2	100%	0.34
15.3	0.43	0.20	0.80	0.30	0.72	21.6	23.0	97%	0.62
16.3	0.43	0.20	0.80	0.29	0.69	28.5	30.5	36%	1.09

Como se puede observar, en el caso 1 no ocurre licuación en los estratos evaluados. Además, en el último se registra un FSL de 5.80, lo cual es bastante elevado en comparación a los anteriores. Sin embargo, para el caso 2, sí se registra licuación hasta 15.3 m.

3.3 Discusión de resultados

Con los valores de factor de seguridad de licuación de cada uno de los métodos aplicados, se obtiene la siguiente tabla de resumen:

Tabla 16: Resumen de FSL para el caso 1

SUCS	Prof. Análisis	FSL Boulanger e I.M. Idriss (2014)	FSL Kayen R. et al. (2013)	FSL Eurocódigo 8 – AENOR (2011)	FSL Cetin et al. (2016)
SP-SM	3.30	1.16	1.39	0.69	1.19
SP-SM	7.30	1.73	1.86	1.62	2.19
SP-SM	8.30	1.62	2.58	1.56	2.19
SP-SM	9.30	1.13	2.59	0.96	1.35
SP-SM	10.30	1.49	2.58	1.44	2.11
SP-SM	11.30	1.46	3.26	1.41	2.10
SP-SM	12.30	0.99	3.16	0.83	1.22
SP-SM	13.30	1.12	3.77	1.01	1.45
SW-SM	14.30	1.37	3.56	1.24	1.79
SW-SM	15.30	2.35	4.11	1.88	3.26
SM	16.30	8.96	3.89	2.82	5.80

Tabla 17: Resumen de FSL para el caso 2

SUCS	Prof. Análisis	FSL Boulanger e I.M. Idriss (2014)	FSL Kayen R. et al. (2013)	FSL Eurocódigo 8 – AENOR (2011)	FSL Cetin et al. (2016)
SP-SM	3.30	0.29	0.11	0.12	0.27
SP-SM	7.30	0.43	0.14	0.29	0.46
SP-SM	8.30	0.41	0.19	0.28	0.45
SP-SM	9.30	0.28	0.19	0.17	0.27
SP-SM	10.30	0.37	0.18	0.25	0.42
SP-SM	11.30	0.37	0.23	0.25	0.41
SP-SM	12.30	0.25	0.22	0.15	0.23
SP-SM	13.30	0.28	0.26	0.18	0.28
SW-SM	14.30	0.34	0.24	0.22	0.34
SW-SM	15.30	0.59	0.28	0.33	0.62
SM	16.30	2.24	0.26	0.50	1.09

Con el resumen de FSL, se puede graficar, para efectos comparativos, la gráfica de FSL versus profundidad:

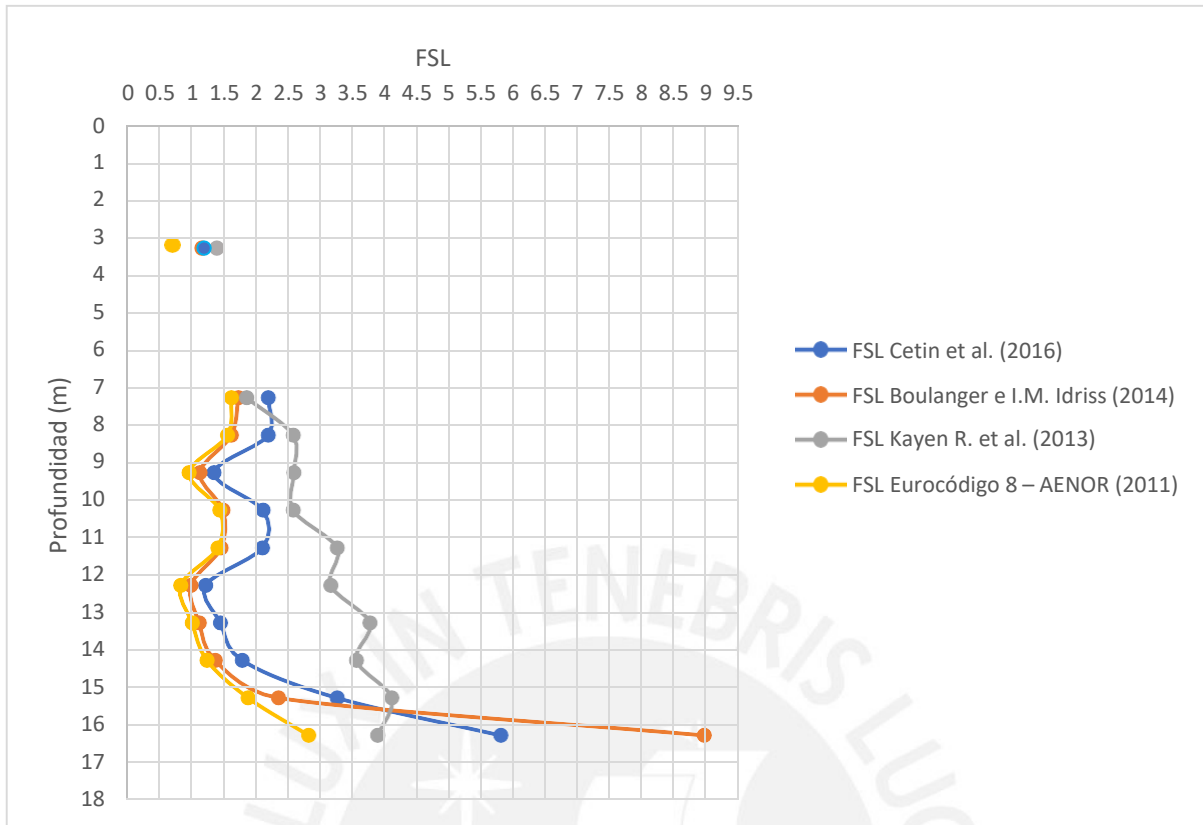


Figura 3: Evaluación de potencial de licuación del caso 1

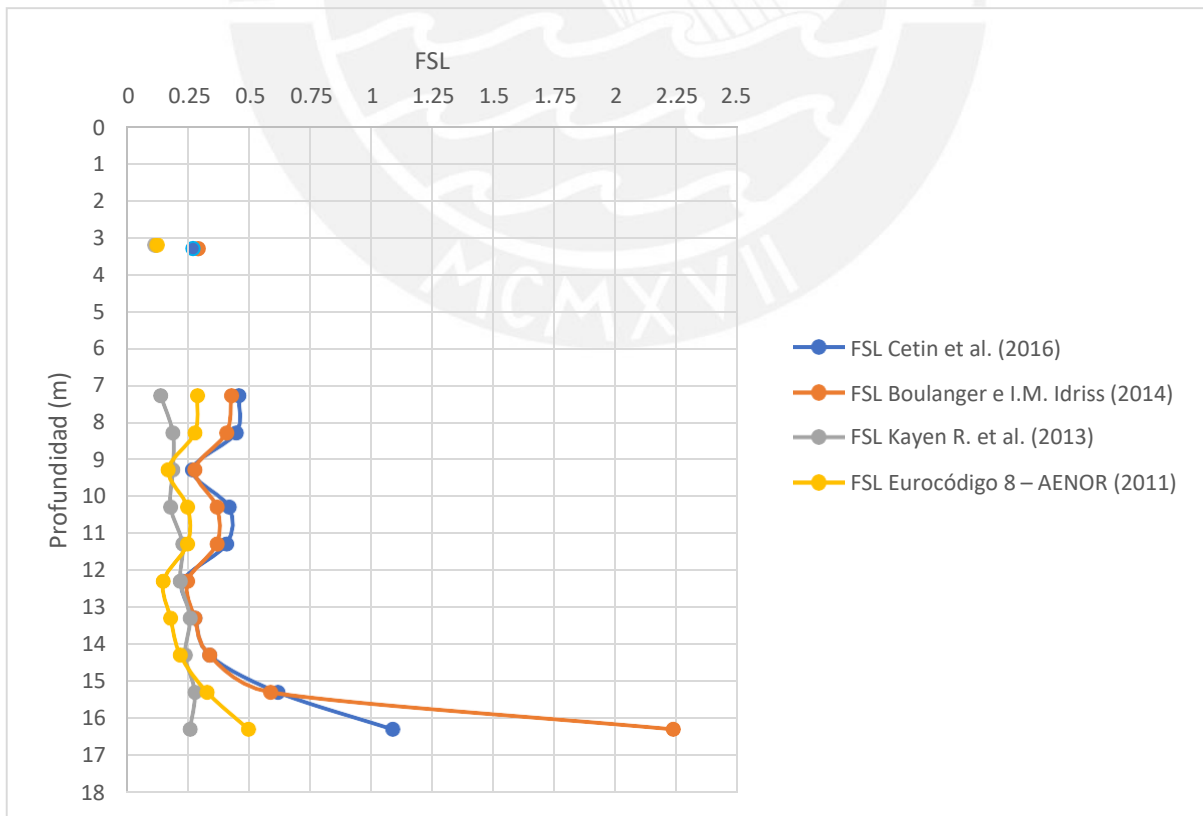


Figura 4: Evaluación de potencial de licuación del caso 2

Como se puede observar, las profundidades a las cuales ocurre la licuación son relativamente similares. No obstante, hay ciertas diferencias importantes a destacar para el caso 1. Primero, para 3.3 metros, lo cual corresponde a un SP-SM, el método del Eurocódigo 8 (2011) es el más conservador, mientras que el de Kayen R. et al (2013) es el menos conservador. Esta tendencia no continúa para las demás profundidades. Después, los valores se mantienen estables en las siete profundidades consecutivas donde se encuentra SP-SM. En estos estratos, los valores que emplean N tienen curvas de formas muy similares entre ellas, a diferencia del método de Kayen R. et al (2013); y siempre el método de Boulanger e I.M. Idriss es el más conservador, mientras que el método del Eurocódigo es el menos conservador. Además, en la profundidad de 9.3 m, se registra un peso específico menor a de los estratos adyacentes, lo cual se traduce en una disminución del FSL en los métodos basados en el número de golpes SPT. Sin embargo, esto no sucede en el análisis con velocidad de ondas de corte, cuyo FSL no varía considerablemente. Las tendencias entre las curvas mencionadas anteriormente se rompen al llegar al estrato SM, en el cual se registran valores de FSL muy diferentes entre todos los métodos. Especialmente, el valor de R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014) incrementa demasiado en relación a los demás. Se considera que ocurre licuación para $FSL = 1$. Las normas podrían tener consideraciones diferentes respecto a este valor.

Lo anteriormente dicho, de alguna manera, también se cumple para el caso 2. No obstante, los métodos tienden a converger mientras el sismo sea mayor. La única diferencia notable es en el método de Kayen R. et al (2013), en el cual se vuelve mucho más conservador a medida que se aumenta la magnitud del sismo y la aceleración. Adicionalmente, se puede observar que el método de R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014) está siempre entre el del Eurocódigo 8 (2011) y el de Cetin et al. (2016); sin embargo, inicialmente está más del lado del Eurocódigo 8 (2011) y, para el caso 2, más del lado de Cetin et al. (2016). Por tanto, se sugiere que este método podría ser sustituido por uno u otro, dependiendo del caso (intensidades menores o mayores), para suelos similares y para FSL bajos.

Además, se destacan algunas principales diferencias a nivel de parámetros. El análisis se centra en seis de estos: el número de golpes del ensayo SPT, la velocidad de ondas de corte, el factor rígido-deformable, el factor de corrección por esfuerzo efectivo, el empleo de potencial de licuación y el factor de escalamiento de magnitud (MSF). Estos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 18: Comparación de parámetros empleados por cada método

Método/Parámetro	N60	Vs	rd	Kσ	PL	MSF
R.W. Boulanger e I.M. Idriss (2014)	SI	NO	SI	SI	NO	SI
Kayen R. et al. (2013)	NO	SI	SI	SI	SI	SI
Eurocódigo 8 – AENOR (2011)	SI	NO	NO	NO	NO	SI
Cetin et al. (2016)	SI	SI	SI	SI	SI	NO

Primero, las diferencias más evidentes son los números de golpes del ensayo SPT y la velocidad de las ondas de corte, pues son la base de los métodos. El método de Cetin et al. (2016) es el más completo en ese sentido, pues está basado en el número de golpes del ensayo SPT y considera la velocidad promedio de las ondas de corte sobre los 12 metros de profundidad.

Por otro lado, se nota que el rd no es calculado en el método del Eurocódigo 8 (2011). Además, este rd es calculado de manera muy diferente en cada método. Esto se debe a que en distintas publicaciones se identifican errores los cuales varían de forma significativa las fórmulas de estimación de rd . Este valor es el que suele tener más error, pues se trata de un factor que solo debe afectar por profundidad y no por tipo de suelo. La dificultad radica en que el tipo de suelo varía mucho los resultados, por lo que la sensibilidad del propio rd es alta.

Las correcciones por presión efectiva están presentes en los métodos de Boulanger e I.M. Idriss (2014), en el de Kayen R. et al. (2013) y en el de Cetin et al. (2016). Sin embargo, el primero presenta un modo de cálculo diferente a los dos últimos. Debido a la naturaleza del método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011), no es necesario hacer este cálculo. Este valor depende, en los métodos de Kayen R. et al. (2013 y Cetin et al. (2016), de los coeficientes derivados de análisis estadísticos. Debido a que el método Eurocódigo 8 – AENOR (2011) es gráfico, este efecto podría estar incluido, aunque con menor precisión.

Los métodos de Kayen R. et al (2013) y Cetin et al. (2016) están basados en una probabilidad de licuación. No obstante, para efectos comparativos, se ofrecen maneras de obtener el valor del factor de seguridad a partir de la probabilidad de licuación. Por ejemplo, en el método de Cetin et al. (2016) se propone una expresión para calcular el factor de seguridad a partir de una probabilidad de licuación del 50%. No obstante, se puede obtener el factor de seguridad para otro porcentaje de probabilidad, pues se cuenta con una expresión general. Sin embargo, el autor sugiere emplear 50%.

Finalmente, se observa que no se emplea el MSF en el método de Cetin et al. (2016). Esto es debido a que este método, a diferencia de otros, no compara directamente CRR y CSR, sino que se obtiene a partir de un FSL, que a su vez se obtiene a partir de un CSR. Sin embargo, sucede el proceso inverso. En vez de llevar el sismo normalizado (7.5 Mw) al sismo evaluado, se obtiene el sismo normalizado a partir del real evaluado.



CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011) resulta ser el más conservador para el primer caso de cálculo, pues es aquel con un menor valor de factor seguridad de licuación en toda la profundidad del suelo analizado. Mientras que en el segundo caso, el resultado es compartido entre el método de Kanyen et al. (2013), con mayor presencia, y el del Eurocódigo 8 – AENOR (2011). Para ambos casos de cálculo, los valores del FSL en profundidad del método de Kanyen et al. (2013), varían drásticamente pasando del menos conservador, en el primer caso, al más conservador en el segundo. Eso quiere decir que conforme se aumenta la magnitud del sismo y la aceleración, los métodos que utilizan velocidad de ondas de corte tienen un resultado más conservador en relación a situaciones sísmicas moderadas o leves. Asimismo, el método más conservador entre los métodos que utilizan datos del ensayo SPT, es el del Eurocódigo 8 – AENOR (2011), y el menos conservador, el de Cetin et al. (2016).

La forma de las curvas por método para evaluar el potencial de licuación en profundidad, o curvas FSL vs. Profundidad, se ve influenciada directamente en el tipo de resultados in situ utilizados para cada método, y es que en ambos casos de cálculo las curvas correspondientes a métodos que utilizaron los resultados del ensayo SPT son muy parecidas entre sí, mientras que la curva que utiliza a la velocidad de ondas de corte es diferente. Esto se debe a que la naturaleza de los métodos basados en la velocidad de las ondas de corte es diferente a la de los métodos que emplean el número de golpes N . Por otro lado, a pesar de que el método de Cetin et al. (2016) utiliza ambos datos de ensayos in situ, la curva final es característica de un método que utiliza el número de golpes del ensayo SPT. Esto tiene sentido, pues no se considera la velocidad de ondas de las ondas de corte por estrato, sino solo una representativa hasta una determinada profundidad, por lo que la curva no se ve afectada de manera diferente con la profundidad.

El método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011), resulta ser el más práctico entre todos los métodos, por ser un método gráfico y ser parte de una norma internacional; la practicidad se ve reflejada en que sea calificado, en esta investigación, como un método conservador. El método de Cetin et al. (2016) es el más completo, y probablemente el más confiable, debido al número de variables y parámetros utilizados.

Los valores de r_d varían poco entre sí, los resultados dependen de diferente cantidad de variables por método, algunos son más complejos en cuanto a fórmula que otros. Los valores r_d , son mayores en el método de R.W. Boulanger e I.M. Idriss. Por otro lado, el valor de MSF, que es constante a profundidad, es mayor para el método del Eurocódigo 8 – AENOR (2011) para el primer caso, mientras para el segundo caso de cálculo es para el método de Kayen R. et al. (2013).

Pese a que los métodos de Kayen R. et al (2013) y Cetin et al. (2016) están basados en una probabilidad de licuación, y se caractericen como métodos probabilísticos, no hay problema de uso para su análisis junto con métodos determinísticos. Y en caso de uniformizar, se puede utilizar una probabilidad de licuación adecuada siempre que sea necesario. La complejidad de las fórmulas usadas en métodos probabilísticos, no cambia el resultado de manera drástica en relación con los demás métodos de licuación.

Se pueden utilizar los métodos para la evaluación del potencial de licuación que utilizan resultados del ensayo SPT y la velocidad de las ondas de corte a la par. Como prueba se encuentra la metodología de Cetin et al. (2016). Sin embargo, los métodos que utilizan velocidad de ondas de corte suelen ser utilizados en situaciones especiales, y no siempre están disponible datos de caracterización de suelos con este ensayo de suelos in situ. Por ese motivo, la comunidad de ingeniería suele utilizarlos como un método complementario, que tiene más efectividad cuando se usa en combinación con métodos que utilizan ensayos SPT. (R. W. Boulanger & I. M. Idriss., 2014)

4.2 Recomendaciones

Se recomienda ampliar el rango del trabajo de investigación para el análisis comparativo de métodos de evaluación de potencial de licuación para suelos cohesivos. Para este trabajo fue descartado el análisis de los estratos de suelo limoso, MH, debido a que los métodos utilizados únicamente se aplicaban en depósitos de arena.

Es necesario incluir en el trabajo la comparación de métodos en donde se utilicen los datos del ensayo in situ CPT, que hoy en día es uno de los más empleados a nivel internacional, así como uno de los más precisos en cuanto a resultados en comparación del ensayo SPT y otros que son dependientes de las características del suelo.

Se invita a los investigadores peruanos y a la comunidad de ingeniería geotécnica a realizar una base de datos en el territorio peruano con resultados de diferentes ensayos in situ, para la evaluación del comportamiento de los suelos propensos a licuación. De esa forma será posible ampliar la investigación para diferentes condiciones geológicas y eventos sísmicos en el Perú. Y es que pese a que el Perú es un país altamente sísmico, con suelos propensos a licuar, los investigadores no utilizan eventos sísmicos pasados de nuestro país por ausencia de datos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alata J., Zevillanos W., y Durán G. (2020). Correlación empírica entre la velocidad de onda de corte y el valor N del ensayo de penetración estándar en suelos arenosos de la ciudad de Juliaca – Perú. *18 Th Laccei International Multi-Conference For Engineering, Education, And Technology*. Buenos Aires, Argentina. [//dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.392](https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.392)
- Alata J., y Zevillanos, W. (2021). *Correlación entre el número de golpes N60 del Ensayo de Penetración Estándar y la Velocidad de ondas de corte (Vs) para los suelos arenosos del distrito de Juliaca – Puno*. [Tesis de pregrado en Ingeniería Civil]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú. <http://hdl.handle.net/10757/656163>
- Asociación Española De Normalización Y Certificación (AENOR), 2011, Eurocódigo 8: Proyecto De Estructuras Sismorresistentes. Parte 5: Cimentaciones, Estructuras De Contención Y Aspectos Geotécnicos (UNE-EN 1998-5): Madrid.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Kayen, R. E., Moss, R. E. S., Bilge, H. T., Ilgac, M. y Chowdhury, K. (2016). Summary of SPT based field case history data of Cetin (2016) Database. Ankara: Soil Mechanics & Foundation Engineering Research Center.
- Instituto Geofísico del Perú (IGP) (2016). [Mapa de peligro sísmico del Perú – Período 1960 – 2016]. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida. Recuperado el 25 de junio de <http://intranet.igp.gob.pe/productopeligrosismico/>
- Jha, S.K., Karki, B. y Bhattarai, A. (2020). Deterministic and Probabilistic Evaluation of Liquefaction Potential: A Case Study from 2015 Gorkha (Nepal) Earthquake. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 4369–4384. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01277-7>
- Kayen, R.; Moss, R. E. S.; Thompson, E. M.; Seed, R. B.; Cetin K. O.; Der Kiureghian, A.; Tanaka, Y. y Tokimatsu, K. (2013). Shear-Wave Velocity-Based Probabilistic And Deterministic Assessment Of Seismic Soil Liquefaction Potencial. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013.139. 407-419. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000743)
- Ministerio de Vivienda, Construcción Y Saneamiento. (2018). Norma Técnica E.050 Suelos Y Cimentaciones. Reglamento Nacional De Edificaciones (RNE). Sencico. Lima, Perú.

- Pastor J., Tomás R., Cano M., y Riquelme A. (2017). Estudio comparativo del potencial de licuación de suelos usando las normas españolas y el Eurocódigo. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, No. 3, Pp. 761-778.
<https://doi.org/10.18268/bsgm2018v70n3a9>
- Rapti, I. (2016). *Numerical modeling of liquefaction-induced failure of geotechnical structures subjected to earthquakes*. [Tesis doctoral de Ingeniería Civil] Université Paris-Saclay – CentraleSupélec, Paris, Francia. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01329628>
- R. W. Boulanger & I. M. Idriss. (2014). CPT and SPT based Liquefaction Triggering Procedures. University Of California At Davis, California, Unites States of America.
- Sladen, J. A., D'hollander, R. D., y Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 564-578.
<https://doi.org/10.1139/t85-076>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*, 97(9), 1249-1273.