

Análisis de la variabilidad en la evaluación del potencial de licuación debida al uso de diferentes ensayos in situ, versiones del procedimiento simplificado y parámetros de entrada

Analysis of the variability in the assessment of the liquefaction potential due to the use of different in situ tests, versions of the simplified procedure and input parameters

Fecha de entrega: 18 de enero 2022

Fecha de aceptación: 4 de abril 2022

Natalia Guerrero¹, Felipe Kuncar², Catalina Mancilla³ y Óscar Taiba³

¹ Jacobs School of Engineering, Universidad de California, San Diego CA, EEUU, nguerrer@ucsd.edu

² Department of Civil and Natural Resources Engineering, Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda, felipe.kuncar@pg.canterbury.ac.nz

³ Ferrara - Proyectos Especiales, Av. Ossa 235, oficina 1150, La Reina, Región Metropolitana de Santiago 7870117, Chile, catalina.mancilla@ferrara.cl, oscartaiba@ferrara.cl

El terremoto del Maule del año 2010 de magnitud $M_w = 8.8$, produjo daños significativos inducidos por licuación en una gran extensión de Chile, dando cuenta de la importancia de evaluar adecuadamente la potencial ocurrencia de este fenómeno en los proyectos de ingeniería civil. Usualmente, esta evaluación se realiza en base a un procedimiento simplificado desarrollado originalmente por Seed e Idriss (1971). Sin embargo, en la actualidad existen versiones alternativas de este método, las cuales pueden arrojar resultados disímiles. Esta variabilidad se suma a otras fuentes de incertidumbre que están presentes en la evaluación, y que no son cuantificadas en la práctica. En este artículo se examina la variabilidad en la evaluación del potencial de licuación introducida por el uso de diferentes ensayos in situ, versiones de procedimiento simplificado, y variaciones en los parámetros de entrada. Para esto se estudian tres sitios ubicados en diferentes regiones del país, en los cuales se cuenta con resultados de ensayos SPT y CPTu. El objetivo principal es ilustrar los efectos que esta variabilidad puede tener en las conclusiones de este tipo de análisis.

Palabras clave: licuación, procedimiento simplificado, variabilidad, ensayos in situ

The 2010 Maule earthquake with a magnitude $M_w = 8.8$ caused significant liquefaction-induced damage in a large area of Chile, showing the importance of properly evaluating the potential occurrence of this phenomenon in civil engineering projects. Usually, this assessment is based on the simplified procedure originally developed by Seed and Idriss (1971). However, alternative versions of this procedure currently exist, which can produce different results. This variability is added to other sources of uncertainty that are present in the evaluation, which are not quantified in practice. In this paper, we examine the variability in the evaluation of liquefaction potential that is introduced by the utilization of different in situ tests, versions of the simplified procedure, and input parameters. For this, we study three sites located in different regions of the country, where SPT and CPTu results are available. The main objective is to show the effects that this variability can have on the conclusions of this type of analysis.

Keywords: liquefaction, simplified procedure, variability, in situ tests

Introducción

El fenómeno de licuación fue observado en múltiples sitios luego del terremoto del Maule del 27 de febrero del año 2010 (27F), en una extensión cercana a 1000 km, y tuvo un rol central en el desempeño sísmico de varios edificios,

puertos y estructuras industriales (e.g. Verdugo *et al.*, 2010; Verdugo y González, 2015). Lo anterior confirmó la importancia de evaluar adecuadamente el potencial de licuación y sus posibles efectos en los proyectos de ingeniería civil desarrollados en Chile.

susceptible, ¿la licuación se iniciará?; (iii) si la licuación se inicia, ¿ocurrirá daño?.

Considerando que la licuación es un fenómeno asociado a suelos no cohesivos como gravas, arenas y limos de baja plasticidad (Idriss y Boulanger, 2008), el índice de plasticidad IP y el índice de tipo de comportamiento de suelo del CPT I_c son utilizados típicamente como indicadores para establecer qué suelos son susceptibles a licuar (i). Si bien en la literatura existe discusión en torno a qué límites considerar, en este estudio se adoptan los criterios $IP < 18$ (Bray y Sancio, 2006) e $I_c < 2.6$ (Robertson y Wride, 1998) para establecer que los suelos son susceptibles a licuar. Suelos fuera de ese rango son automáticamente dejados fuera del análisis.

Para establecer el inicio de la licuación (ii), se utiliza el procedimiento simplificado (Seed e Idriss, 1971), el cual permite calcular un factor de seguridad FS frente a la licuación mediante la ecuación (1).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} MSF K_{\sigma} K_{\alpha} \quad (1)$$

donde CRR es la razón de resistencia cíclica del suelo, CSR es la razón de sollicitación cíclica del suelo, $CRR_{7.5}$ es la razón de resistencia cíclica del suelo para un sismo de magnitud 7.5, MSF es el factor de escala de magnitud del sismo, K_{σ} el factor de corrección por confinamiento y K_{α} es el factor de corrección por corte (Youd e Idriss, 2001).

En la actualidad existen versiones alternativas de este procedimiento, propuestas por diferentes autores, basadas en distintos tipos de mediciones in situ y bases de datos. Particularmente en este estudio se utilizan los métodos de Youd e Idriss (2001) (en adelante Y&I2001) y Boulanger e Idriss (2014) (en adelante B&I2014) tanto para el ensayo SPT como para el CPTu. De acuerdo a la experiencia de los autores, estos métodos son los más empleados en la práctica nacional.

Finalmente, para estimar los daños o efectos que producirá la licuación en superficie (iii), un enfoque práctico, que opera dentro del mismo marco conceptual utilizado en (ii), es la utilización de índices de vulnerabilidad. En el presente artículo se utiliza el asentamiento por reconsolidación post-licuación en una dimensión S_{v1D}

en campo libre (Idriss y Boulanger, 2008), el cual es comúnmente usado en la práctica para evaluar los efectos de la licuación y generar recomendaciones, como, por ejemplo, definir mejoramientos de suelo. La metodología descrita anteriormente se resume en la Figura 2.

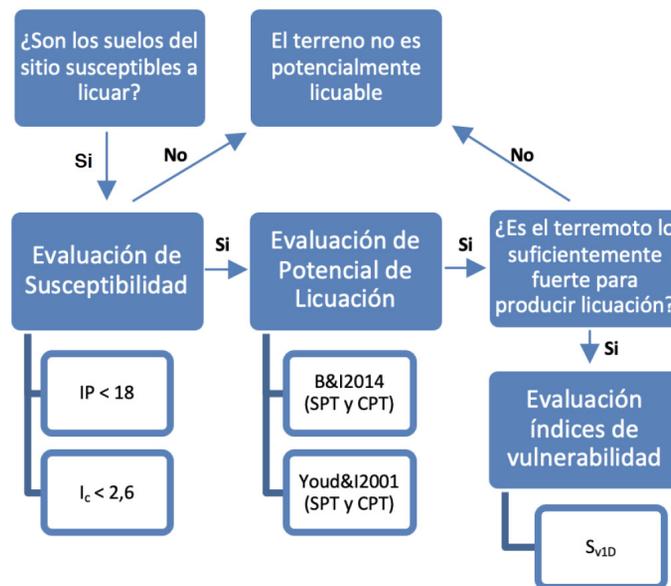


Figura 2: Metodología empleada para evaluar la licuación

Comparación directa entre resultados de SPT y CPTu

En primer lugar, se realiza una comparativa directa entre los factores de seguridad a la licuación obtenidos mediante los ensayos SPT y CPTu dentro de un mismo sitio, fijando la versión del procedimiento simplificado (en adelante método) utilizada. El método escogido corresponde a B&I2014, ya que es uno de los más recientes y utilizados en la práctica. Dado que la comparativa es punto a punto en profundidad, se escogen pares de ensayos SPT-CPTu cercanos para realizar este análisis, adoptándose como criterio un distanciamiento máximo en planta de 10 m entre ensayos. Los pares de ensayos seleccionados se indican en la Tabla 2. Debido a que el sitio 3 presenta una estratigrafía muy variable, con intercalaciones entre estratos finos y granulares, sumado a una topografía cambiante, este no se consideró para este análisis, ya que para una misma profundidad se podría no estar comparando el mismo suelo. En el caso de los sitios 1 y 2 los terrenos son prácticamente planos, con una estratigrafía poco variable y horizontal, y por lo tanto es razonable utilizarlos para este análisis.

Tabla 2: Ensayos escogidos para la comparación directa entre resultados SPT y CPTu

| Sitio | SPT | CPTu | Distancia entre ensayos, m | Prof. máxima comparada, m | Método |
|-------|-----|------|----------------------------|---------------------------|---------|
| 1 | 1 | 1 | 10 | 20 | B&I2014 |
| 1 | 1 | 3 | 8 | 26 | B&I2014 |
| 2 | 1 | 1 | 4 | 15 | B&I2014 |
| 2 | 2 | 2 | 5 | 15 | B&I2014 |

Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de examinar en mayor detalle la variabilidad que puede existir en la evaluación de la licuación para un sitio determinado, se realiza un análisis de sensibilidad que contempla variaciones tanto en los ensayos utilizados (SPT y CPTu) como en los parámetros de entrada y método adoptado. Para efectuar este análisis se utiliza como variable de salida el índice de vulnerabilidad S_{VID} , el cual entrega un valor representativo del efecto global de la columna de suelo, considerada hasta los 20 m de profundidad en este estudio.

Para este análisis se seleccionó un par de ensayos SPT-CPTu por cada sitio, cumpliendo con el criterio de que ambos se hayan realizado al menos hasta los 20 m de profundidad. Debido a que en este caso la comparativa es a nivel global, es decir, no punto a punto como en el caso anterior, se incorpora el sitio 3 al análisis. La Tabla 3 muestra los pares de ensayos escogidos.

Tabla 3: Ensayos escogidos para el análisis de sensibilidad

| Sitio | SPT | CPTu | Distancia entre ensayos, m | Valor base S_{VID} SPT, cm | Valor base S_{VID} CPT, cm |
|-------|-----|------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 3 | 8.0 | 19.1 | 16.8 |
| 2 | 4 | 2 | 16.0 | 1.8 | 14.5 |
| 3 | 1 | 2 | 13.0 | 32.0 | 14.3 |

Por otro lado, a continuación, se indican los cinco parámetros escogidos para el análisis de sensibilidad y se discute la relevancia de considerarlos en este análisis tomando en cuenta la variabilidad asociada a cada uno de ellos.

1) Aceleración máxima a_{max} : es uno de los parámetros que define la demanda sísmica de diseño y es utilizada para calcular CSR. Generalmente se obtiene a través de un estudio de amenaza sísmica desarrollado específicamente para el sitio. a_{max} puede presentar variaciones para un mismo sitio dependiendo de cómo se realice este estudio

(determinístico, probabilístico). Además, diferentes estudios pueden utilizar modelos predictivos (GMPEs) alternativos o asignarles pesos diferentes en el árbol lógico, entre otros aspectos que pueden variar. Finalmente, cada modelo predictivo tiene un nivel de incertidumbre, expresado en su desviación estándar.

2) Magnitud M_w : es el segundo parámetro que define la demanda sísmica de diseño y se utiliza para calcular MSF. Generalmente se obtiene a través de un estudio de amenaza sísmica y, por lo tanto, su variabilidad está condicionada según los mismos criterios que a_{max} .

3) Nivel freático N_f : debido a que la licuación es un fenómeno asociado a suelos saturados, el nivel freático adoptado define qué estratos son excluidos del análisis, además de tener efectos en el cálculo de CRR, K_σ y K_α . El nivel freático es por naturaleza variable, por ejemplo, existe una variación estacional, pero además existe una incertidumbre importante asociada a su medición. Por ejemplo, si la medición se realiza inmediatamente después de realizado un sondaje, esta podría presentar alteraciones debido a la presencia de aditivos.

4) Peso específico γ : tiene efectos en el cálculo de CRR, K_σ y K_α . Debido a que su medición directa y continua en profundidad presenta dificultades, en la práctica es usualmente estimado en base al tipo de suelo, o a través de correlaciones, por ejemplo, con parámetros del CPTu. Debido a lo anterior, es natural que exista una incertidumbre considerable asociada a este parámetro.

5) Porcentaje de energía del ensayo SPT ER_i : es uno de los factores de corrección que debe ser aplicado al número de golpes N_{SPT} , teniendo una gran influencia en su valor final normalizado y, por ende, en el cálculo de CRR. Si bien la norma NCh3364 (2014) exige que el equipo utilizado para ejecutar el ensayo SPT tenga una medición de energía vigente, con una antigüedad no mayor a un año para análisis de licuación, los autores han observado que esta no es una práctica generalizada en el país. Por otro lado, la medición misma contiene incertidumbre, ya que el valor de ER_i que finalmente se utiliza es el valor promedio reportado después de una serie de mediciones que presentan cierto nivel de variabilidad.

En la Tabla 4 se indican los rangos en que se decidió variar cada parámetro. Como se observa, se realizan dos análisis

de sensibilidad independientes. En el primero se establece una variación porcentual fija de $\pm 15\%$, lo que permite visualizar el efecto porcentual que cada variación genera en el índice S_{vID} . En el caso de M_w , este parámetro se truncó en un valor máximo de 9.5 para limitarlo a valores realistas. Debido a que en este primer análisis la variación real que sufre cada parámetro depende de la magnitud del valor base, esto puede distorsionar los resultados y las conclusiones. En consecuencia, se decide realizar un segundo análisis, estableciendo los rangos de variación de los parámetros en base a valores límites razonables que podrían darse en la práctica (según la experiencia de los autores), para examinar de esta forma los rangos máximos de variación que podrían derivarse.

Tabla 4: Análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada

| Parámetro | Análisis de sensibilidad 1 | Análisis de sensibilidad 2 |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| a_{max} , g | $[0.85a_{max}, 1.15a_{max}]$ | $[0.2, 1.0]$ |
| M_w | $[0.85M_w, 1.15M_w]$ | $[7.0, 9.5]$ |
| N_i , m | $[0.85N_i, 1.15N_i]$ | $[0, 4]$ |
| γ , kN/m ³ | $[0.85\gamma, 1.15\gamma]$ | no se considera |
| ERi, % | $[0.85ER_i, 1.15ER_i]$ | $[60, 100]$ |

Por último, se incluye en el análisis la variabilidad derivada de utilizar versiones alternativas del procedimiento simplificado. En este caso, se decidió utilizar como caso base B&I2015 y variación Y&I2001.

Para visualizar los resultados y realizar el análisis de una manera adecuada se utilizan gráficos de tornado. La principal ventaja de este tipo de gráficos es que permiten observar cuán significativa es la variación de cada parámetro de manera aislada respecto a los demás. Tanto la variación de ensayos, como de parámetros y métodos se presentan en el mismo gráfico para poder analizar su importancia relativa en cada caso. El valor base (sin perturbar) de S_{vID} calculado en cada caso se entrega en la Tabla 3 y corresponde al obtenido mediante los parámetros indicados en la Tabla 1.

Resultados

Comparación directa de resultados SPT y CPTu

En la Figura 3 se muestra la comparativa establecida en la Tabla 2, de los FS obtenidos en profundidad entre los ensayos SPT y CPTu.

Comparando los resultados del Sitio 1 (Figura 3(a)) es posible observar que el FS de ambos CPTu arrojan resultados similares, reconociendo los mismos estratos licuables entre los 3.0 y 4.0 m (FS=0.70 aproximadamente), 5.0 a 14.0 m (FS = 0.30 aprox.) y 18.0 a 20.0 m (FS = 0.40 aprox.). Al comparar estos FS con los del SPT, se observa que estos coinciden con las profundidades de los estratos licuables detectado entre los 3.0 a 15.0 m, con FS similares, y además coinciden en los estratos inferiores entre 18.0 a 20.0 m de profundidad (FS = 0.4 aprox.).

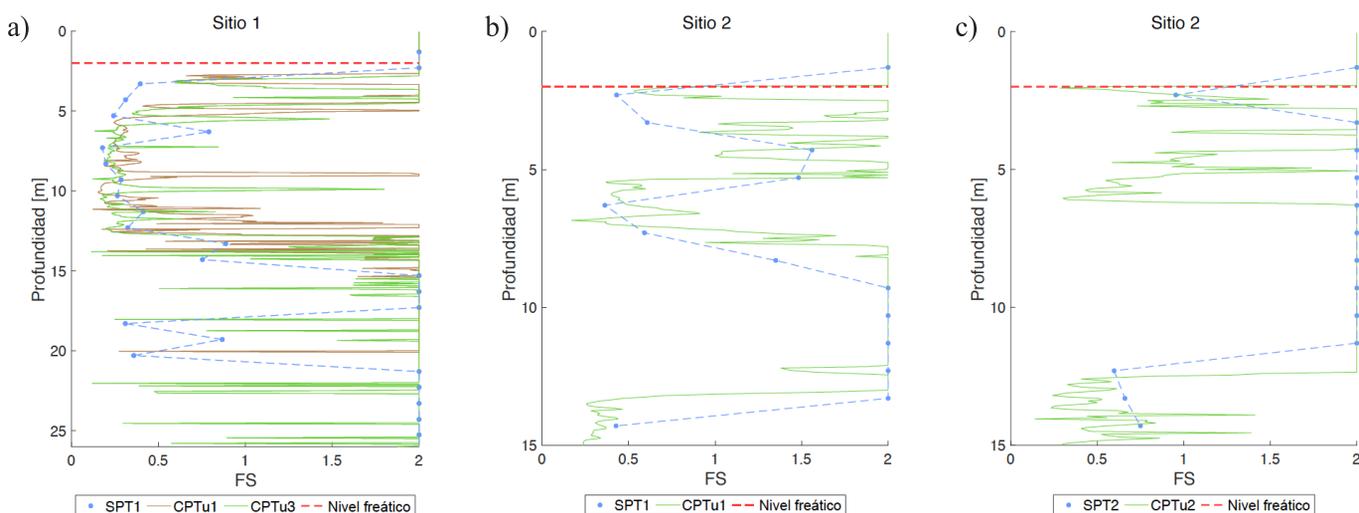


Figura 3: FS de licuación en profundidad. Comparativa SPT vs CPTu en sitios: a) 1, b) 2 y c) 2

Ahora, observando los resultados para el Sitio 2 (Figuras 3(b) y 3(c)) queda en evidencia que CPTu1 y CPTu2 entregan factores de seguridad similares en profundidad y son capaces de reconocer los mismos tres estratos licuables entre los 2.0 a 3.0 m (FS = 0.5 aprox.), entre 4.0 a 7.5 m (FS = 0.5 aprox.) y 12.0 a 15.0 m de profundidad (FS = 0.4 a 0.7 aprox.). En cambio, al comparar FS entre SPT1 y SPT2 se evidencia una diferencia entre los estratos licuables detectados, ya que el primer ensayo concuerda con los tres estratos licuables de los CPTu con capas licuable entre los 2.0 a 3.0 m (FS = 0.5 aprox.), 6.0 a 7.5 m (FS = 0.4 aprox.) y a los 14.0 m (FS = 0.4 aprox.), mientras que SPT2 considera que el suelo no es licuable en ese rango, pero sí detecta un punto licuable a partir de los 12.0 m. Ahora, comparando los resultados de FS de CPTu y SPT, para la Figura 3(b), se observa que estos coinciden en la detección los tres estratos licuables. En el caso de la Figura 3(c), el SPT solo es capaz de detectar el último estrado licuable.

Tanto en los resultados del Sitio 1 como del Sitio 2, el SPT con el CPTu coinciden en la detección de los estratos licuables, a excepción del SPT2 del Sitio 2. En este último caso (Figura 3(c)) el SPT no fue capaz de detectar las capas licuables más superficiales, lo que puede atribuirse en parte a su baja resolución (mediciones cada 1 m), comparado con el CPTu (mediciones cada 5 cm). Además, comparando el mismo tipo de ensayo para cada sitio, CPTu demostró tener una mayor repetibilidad que el SPT, como se puede observar en la Figura 3(a) para el CPTu y las Figuras 3(b) y 3(c) para el SPT.

La ecuación (2) corresponde a la relación entre los ensayos SPT y CPTu utilizada por Idriss y Boulanger (2004) para evaluar la consistencia entre métodos. Esta aplica a arenas con un contenido de finos menor o igual al 5%.

$$\frac{q_{c1N}}{(N_1)_{60}} = \frac{(2.092D_R + 2.224)^{3.788}}{46(D_R)^2} \quad (2)$$

Donde q_{c1N} es las resistencia de punta del cono normalizada, $(N_1)_{60}$ es la resistencia a la penetración estándar normalizada y D_R es la densidad relativa. La relación (2) es utilizada a continuación como referencia para comparar las diferencias observadas en la Figura 3. Para esto, en la Figura 4 se grafican junto a esta correlación los pares SPT-CPTu utilizados en la Figura 3, en términos de $(N_1)_{60cs}$ y q_{c1Ncs} ,

donde el subíndice cs hace referencia a arena limpia equivalente (*clean sand*). Para poder comparar los ensayos en profundidad, los datos del CPTu fueron promediados en los rangos de 30 cm asociados a la medición de N2+N3 que resulta en el N_{SPT} correspondiente.

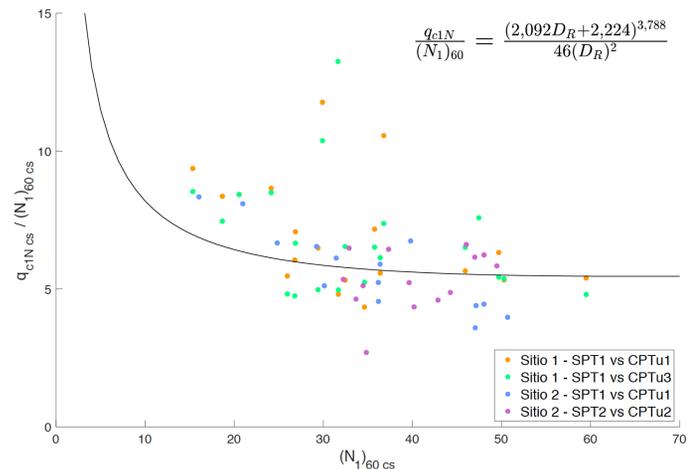


Figura 4: Comparación entre pares SPT-CPTu junto con correlación (2) de Idriss y Boulanger (2004)

Lo primero que puede observarse en la Figura 4 es que existe una dispersión significativa de los datos, lo que indica un ajuste débil a la curva de referencia (2) y refleja un alto grado de variabilidad en la caracterización geotécnica. Además, puede observarse que para valores de $(N_1)_{60cs}$ inferiores a aproximadamente 25, todos los datos se encuentran por sobre la curva de referencia (2), y para valores superiores a 25 los datos tienden a centrarse en torno a la curva, con la excepción de algunos valores atípicos que se alejan de manera importante. Lo anterior indica que el ajuste tiende a empeorar en el rango de valores de $(N_1)_{60cs}$ que es más relevante para la evaluación de la licuación, es decir, suelos más sueltos, donde el ensayo CPTu está reconociendo una mayor compacidad que el SPT.

Si bien la Figura 3 mostró que el ensayo SPT es capaz, en muchos casos, de capturar los mismos estratos licuables que el ensayo CPTu, lo que muestra la Figura 4 es que esto está sujeto a una gran variabilidad.

De acuerdo a Idriss y Boulanger (2004), la forma de la curva (2) puede entenderse en parte por las condiciones de drenaje de los ensayos SPT y CPTu, siendo el primero un ensayo marcadamente no drenado (generando un incremento positivo en la presión de poros para valores bajos de $(N_1)_{60}$), mientras que el segundo es un ensayo

drenado o parcialmente drenado, dependiendo de la distribución de tamaños de partícula (permeabilidad). Esta dependencia de la relación $q_{c1N}/(N_1)_{60}$ de las condiciones de drenaje de los ensayos, que a su vez depende del tipo de suelo y de cómo estos ensayos se ejecuten, introduce una complejidad que podría explicar en parte la gran variabilidad observada en la Figura 4.

Para la correcta interpretación de la Figura 4, sin embargo, hay que tener en consideración la diferencia de resolución entre ambos ensayos. En cada tramo de 30 cm que representa un dato del SPT se tienen alrededor de 6 datos capturados por el CPTu, lo que puede tender a distorsionar la relación entre ambos, especialmente en el caso de tramos con propiedades variables. A esto hay que agregar que para poder presentar los puntos junto a la curva de referencia se tuvo que corregir los datos para llevarlos a una arena limpia equivalente, lo que introduce un nivel adicional de distorsión.

Análisis de sensibilidad

En la Figura 5 se pueden observar los resultados de los análisis de sensibilidad 1 y 2 para los 3 sitios en estudio. Observando la variación de a_{max} , según el análisis de sensibilidad 1, esta no afecta a ninguno de los sitios de manera significativa, siendo el SPT del Sitio 2 el más sensible con un 6% debido al límite inferior; en CPTu la variación se mantiene bajo el 4% para cada límite. Con el análisis de sensibilidad 2 queda más clara la tendencia de que todos los sitios son más sensibles a una menor que a una mayor aceleración tanto en SPT como CPTu. Esto tiene explicación en el método escogido para calcular el asentamiento S_{vID} ; este llega a un valor límite para factores de seguridad muy bajos, por lo que una mayor aceleración no aumenta drásticamente el valor de este parámetro. Esta puede ser una tendencia extendida en Chile debido a los altos valores de a_{max} que suelen obtenerse en el país, especialmente en ciudades costeras, o sea, más cercanas a la fuente sísmica de terremotos de subducción.

Ahora, al variar M_w en el análisis de sensibilidad 1, queda en evidencia para SPT que solo el Sitio 2 tiene una variación hacia el límite superior, igual a un 14%, mientras que todos los sitios presentan variación hacia el límite inferior. Para CPTu todos los sitios varían tanto para el límite superior como el inferior. El análisis de sensibilidad 2 permite corroborar que la variación del asentamiento S_{vID} es más sensible al disminuir que aumentar M_w , a excepción del

CPTu del Sitio 3, el cual arroja una variación similar ante el aumento o disminución de este. Esto nuevamente puede encontrar explicación en que el método para calcular el asentamiento S_{vID} tiene un valor límite para factores de seguridad muy bajos, lo que es el caso de este sitio.

Al analizar la variación del nivel freático tanto en el análisis de sensibilidad 1 y 2 y los ensayos SPT y CPTu no queda clara la tendencia de qué ocurre con el asentamiento S_{vID} al aumentarla o disminuirla, ya que tiene variaciones positivas y negativas para ambos límites. Esto se debe a que al estar el nivel freático más profundo o superficial hace cambiar los esfuerzos efectivos del suelo, ya que ahora hay más suelo natural sobre el posible estrato licuable, lo que no siempre lleva a una disminución del asentamiento S_{vID} . También tiene relación con si hay más capas licuables en superficie, como es el caso del Sitio 3, que aumenta el asentamiento S_{vID} en un 38% con el nivel freático a nivel cero. Dado lo anterior, al momento de analizar un suelo licuable es bueno considerar dos niveles freáticos, uno al momento de corregir los datos, el cual corresponde al nivel medido en terreno al momento de realizar el ensayo; y otro que corresponda al análisis de potencial de licuación del suelo, para saber dónde es más desfavorable el nivel freático.

El porcentaje de energía de SPT es el parámetro en estudio que muestra variaciones más dramáticas, llegando al 71% de diferencia para el límite inferior en el Sitio 2 análisis 1 y 220% en el análisis 2, mientras que los otros sitios muestran una variación casi simétrica al momento de aumentar o disminuirlo. Esto es porque el Sitio 2 presenta más número de golpes/pie que pasan a licuar al momento de disminuir la energía.

Al variar el peso específico del suelo en el análisis de sensibilidad 1 se aprecia que el aumento de este lleva a un aumento en el asentamiento S_{vID} del sitio y su símil para su disminución. El ensayo CPTu demuestra ser más sensible al cambio en su estimación que SPT, llegando a variaciones cercanas al 20%.

Finalmente, en el análisis de sensibilidad 2 se muestra una comparación del asentamiento S_{vID} para los valores base entre Y&I2001 y B&I2014. Para SPT Y&I2001 presentó una variación promedio de 16% y para CPTu de 15%, siendo en todos los casos un valor menor que lo obtenido utilizando B&I2014.

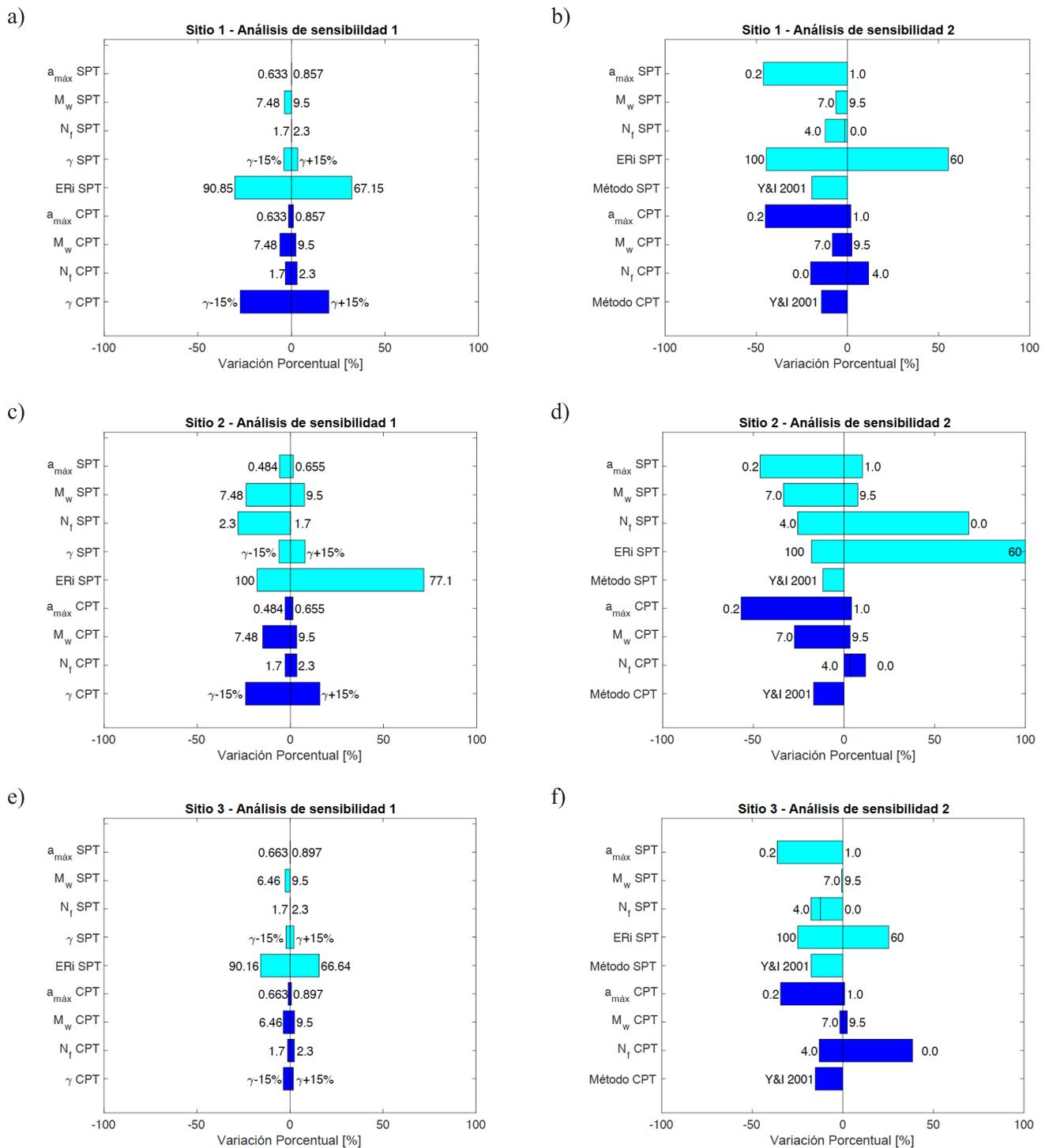


Figura 5: Resultados de análisis de sensibilidad de S_{vID} : (a) análisis 1, Sitio 1, (b) análisis 2, Sitio 1, (c) análisis 1, Sitio 2, (d) análisis 2, Sitio 2, (e) análisis 1, Sitio 3 y (f) análisis 2, Sitio 3

Conclusiones

En este artículo se examinó la variabilidad en la evaluación del potencial de licuación estudiando tres sitios ubicados

en Chile en los cuales se cuenta con datos de ensayos SPT y CPTu. Se muestran los rangos de variación que pueden producirse en la evaluación de la licuación al utilizar los

ensayos y métodos típicamente adoptados en la práctica nacional. Estos métodos son determinísticos, lo que conlleva a que en la práctica no suelen tomarse en cuenta las diferentes fuentes de incertidumbre presentes en el análisis.

En sitios de topografía plana, donde los ensayos SPT y CPTu se encuentran cercanos (distancias entre ellos menores a 10 m), se pudo observar que en promedio existe una correlación relativamente buena entre ambos al utilizar el método de Boulanger e Idriss (2014), tanto en la detección de estratos licuables como en los valores de factor de seguridad obtenidos. Sin embargo, como pudo observarse en la Figura 3(c), en algunos casos el SPT no es capaz de captar capas licuables en las que el CPTu sí puede, lo que puede atribuirse en parte a la diferencia de resolución entre ambos ensayos (mediciones cada 1 m versus mediciones cada 5 cm), dejando en evidencia una de las principales desventajas del SPT. La comparativa punto a punto entre los ensayos SPT y CPTu (Figura 4) mostró además que, si bien puede existir una buena correlación en promedio, esta está sujeta a una gran variabilidad. Una de las posibles causas de esta variabilidad tiene relación con la condición de drenaje que caracteriza a cada ensayo, que depende tanto del tipo de suelo como de la manera en que el ensayo es ejecutado, lo que complejiza la relación entre ambos.

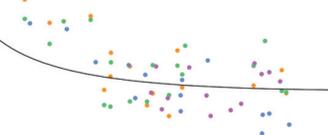
Los resultados de los análisis mostrados en la Figura 5, dejan en evidencia la sensibilidad del procedimiento simplificado respecto a sus parámetros de entrada, lo que se refleja en las variaciones que sufre el índice S_{VID} . Tanto para a_{max} como M_w subestimar su valor tuvo un mayor peso en el asentamiento que sobreestimarlos, lo que se debe a que la forma de calcular S_{VID} presenta un valor límite de este para factores de seguridad muy bajos. Tomando en cuenta que en los tres casos de estudio considerados los valores base de estos parámetros son altos, variaciones hacia un límite superior son menos sensibles. Esto puede ser un patrón generalizado, considerando el alto nivel de amenaza sísmica presente en la mayor parte del país. Por otro lado, el nivel freático no presentó una tendencia clara de aumentar o disminuir el asentamiento según su posición, lo que se puede explicar por el efecto que esta genera en la normalización de los ensayos por confinamiento. En base a

lo anterior, se recomienda considerar dos profundidades de napa para estos análisis, una para la normalización de los ensayos con el nivel medido en terreno y otra que considere la variación estacional de esta para el análisis del potencial de licuación. El parámetro que demostró ser más sensible es el porcentaje de energía ER_i del SPT, lo que subraya la importancia de su medición. Si bien la norma NCh3364 (2014) exige que el equipo utilizado para ejecutar el ensayo SPT tenga una medición de energía vigente, los autores han observado que esta no es una práctica generalizada en el país. Finalmente, tanto para SPT como CPTu, el método de Youd e Idriss (2001) produjo menores valores de asentamiento, con una diferencia de aproximadamente 15%, lo que muestra la importancia de realizar el análisis con más de un método, de tal manera de considerar la incertidumbre epistémica presente en este tipo de análisis.

Tal como lo indica Idriss y Boulanger (2008), el ensayo CPTu, al tener mayor resolución y menor error de medición que el SPT, entrega una confiabilidad mayor en los resultados. Este estudio mostró además que, en algunos casos, los resultados pueden diferir significativamente entre ambos ensayos. Por otro lado, el SPT tiene algunas ventajas importantes sobre el CPTu. Puede haber sitios donde existan capas densas o granulares gruesos por encima de capas licuables, que no podrán ser atravesados por el ensayo CPTu. Además, el sondaje SPT permite visualizar el suelo y obtener muestras para realización de ensayos de laboratorio. En base a lo anterior, se recomienda que siempre se utilicen ambos ensayos de manera complementaria. En Chile la normativa de clasificación sísmica de suelos (DS61, 2011) exige, para una gran cantidad de casos, la ejecución de un sondaje de 30 m con medición continua de SPT cada metro, por lo que ya se contaría con uno de estos ensayos al momento de realizar un primer análisis de licuación, facilitando la opción de contar con ambos para el análisis definitivo.

Agradecimientos

Expresamos nuestros agradecimientos a Ornella Mella y Mikel Jainaga, ingenieros de proyecto de Ferrara, por la gran ayuda brindada en la generación de análisis mediante el programa Matlab.



Referencias

- Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Report UCD/CGM-14/01, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis CA, USA
- Bray, J.D. and Sancio, R.B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **132**(9), 1165-1177
- DS61 (2011). Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios. Decreto Supremo ds61. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Santiago, Chile
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering* ICSDEE and *3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering* ICEGE, D. Doolin *et al.* (eds.), University of California, Berkeley CA, USA, vol. 1, 32-56
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research institute, Oakland CA, USA
- Kramer, S.L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River NJ, USA
- Marchetti, S., Marchetti, D. y Villalobos, F. (2013). El dilatómetro sísmico SDMT para ensayos de suelos in situ. *Obras y Proyectos* **13**, 20-29
- NCh3364 (2014). Geotecnia - Ensayo de Penetración Estándar. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile
- Robertson, P.K. and Wride, C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal* **35**(3), 442-459
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division* **97**(9), 1249-1273
- Verdugo, R. and González, J. (2015). Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **79**, 280-295
- Verdugo, R., Villalobos, F., Yasuda, S., Konagai, K., Sugano, T., Okamura, M., Tobita, T. and Torres, A. (2010). Description and analysis of geotechnical aspects associated to the large 2010 Chile earthquake. *Obras y Proyectos* **8**, 25-36
- Youd, T.L. and Idriss, I.M. (2001). Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **127**(4), 297-313