

## **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

*Natalia Guerrero<sup>1</sup>; Felipe Kuncar<sup>2</sup>; Catalina Mancilla<sup>3</sup>, Oscar Taiba<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>Ingeniera Civil, [nguerrer@ucsd.edu](mailto:nguerrer@ucsd.edu)*

*<sup>2</sup>Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, [felipe.kuncar@pg.canterbury.ac.nz](mailto:felipe.kuncar@pg.canterbury.ac.nz)*

*<sup>3</sup>Gerente de Ingeniería, Ferrara, [catalina.mancilla@ferrara.cl](mailto:catalina.mancilla@ferrara.cl)*

*<sup>4</sup>Socio Gerente, Ferrara, [oscartaiba@ferrara.cl](mailto:oscartaiba@ferrara.cl)*

### **Resumen**

*El terremoto del Maule de 2010 ( $M_w=8,8$ ) produjo daños significativos inducidos por licuación en una gran extensión del país, 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 al procedimiento simplificado desarrollado originalmente por Seed e Idriss. 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*

### **Abstract**

The 2010 ( $M_w=8.8$ ) Maule earthquake caused significant liquefaction-induced damage in a large area of the country, showing the importance of properly evaluating the potential occurrence of this phenomenon in the civil engineering projects. Usually, this assessment is done based on the simplified procedure originally developed by Seed and Idriss. 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*



## 1 Introducción

El fenómeno de licuación fue observado en múltiples sitios luego del terremoto del Maule de 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 (Verdugo & 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.

En la práctica es habitual que esta evaluación se realice a través del procedimiento simplificado propuesto originalmente por Seed e Idriss (1971). Sin embargo, este método ha evolucionado durante los últimos 50 años y en la actualidad existen varias versiones alternativas que utilizan diferentes bases de datos, criterios y tipos de ensayos (e.g., SPT, CPTu). Esta disponibilidad de diferentes opciones para llevar a cabo el análisis introduce una variabilidad en los resultados de la evaluación de la licuación, la que se suma, entre otras fuentes de incertidumbre, a la contenida en los parámetros de entrada del procedimiento. Considerando que los resultados de esta evaluación pueden ser críticos en un proyecto, resulta relevante estudiar la variabilidad introducida en el diagnóstico del potencial de licuación, identificando los efectos que esta puede tener y los aspectos más influyentes, los cuales requerirán de un tratamiento más cuidadoso al momento de realizar el análisis.

En este artículo se estudian tres sitios potencialmente licuables ubicados en diferentes regiones de Chile, en los cuales se cuenta con resultados de ensayos SPT y CPTu. Con estos datos se llevan a cabo análisis comparativos y de sensibilidad que permiten visualizar la variabilidad introducida por el uso de ensayos alternativos, diferentes versiones del procedimiento simplificado y variaciones en los parámetros de entrada.

## 2 Metodología

### 2.1 Sitios a estudiar

Para este estudio se utiliza la información de tres sitios ubicados en diferentes ciudades de Chile: La Serena (Sitio 1), Viña del Mar (Sitio 2) y Concepción (Sitio 3). Lo anterior permite considerar una amplia gama de escenarios, posibles de encontrar en la práctica nacional. En la Fig. 1 se resume la información de los ensayos SPT y CPTu disponibles para la caracterización de cada sitio.

Los ensayos SPT disponibles en cada sitio (indicados en la Fig. 1) fueron realizados, en todos los casos, con equipos de accionamiento automático, lo que favorece una mejor calidad de los resultados. Además, los equipos utilizados contaban, a la fecha de realización de los ensayos, con medición de energía certificada de acuerdo con lo requerido por la norma NCh3364of2014 (NCh3364, 2014). La ejecución de ensayos SPT se realizó cada 1 m de profundidad. En el caso de los ensayos CPTu, estos fueron realizados con un camión CPT, con adquisición de datos cada 5 cm de penetración. En cada sitio se dispone de un estudio de amenaza sísmica, de donde se obtuvieron los parámetros que definen la demanda sísmica de diseño para el análisis de licuación: magnitud ( $M_w$ ) y aceleración máxima en superficie ( $a_{m\acute{a}x}$ ). Con el objetivo de simplificar el posterior análisis, se decidió fijar el nivel freático en 2,00 m. Los parámetros base utilizados en cada sitio se resume en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros base utilizados para el análisis de licuación

Sitio	Ciudad	$M_w$	$a_{m\acute{a}x}$ [g]	Tipo de estudio de amenaza sísmica	Nivel freático [m]
1	La Serena	8,8	0,745	Probabilístico	2,00
2	Viña del Mar	8,8	0,570	Determinístico	2,00
3	Concepción	7,6	0,780	Probabilístico	2,00



## 2.2 Análisis de licuación

Para realizar el análisis de licuación se siguen los lineamientos establecidos por Kramer (1999), que señala que una adecuada evaluación del potencial de licuación debe responder a las siguientes tres preguntas: (i) ¿es el suelo susceptible a la licuación?; (ii) si el suelo es 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 (e.g., gravas, arenas y limos de baja plasticidad) (Idriss & Boulanger, 2008), el índice de plasticidad (IP) y el índice de tipo de comportamiento de suelo ( $I_c$ ) 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 & Sancio, 2006) e  $I_c < 2,6$  (Robertson & 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 & Idriss, 1971), el cual permite calcular un factor de seguridad (FS) frente a la licuación mediante la Ec.(1).

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

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,  $K_\sigma$  el factor de corrección por confinamiento y  $K_\alpha$  es el factor de corrección por corte (Youd & 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 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 ( $S_{v1D}$ ) (Idriss & Boulanger, 2008), el cual es comúnmente usado en la práctica para evaluar los efectos de la licuación y generar recomendaciones (e.g., definir mejoramientos de suelo). La metodología descrita anteriormente se resume en la Fig. 2.

## 2.3 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

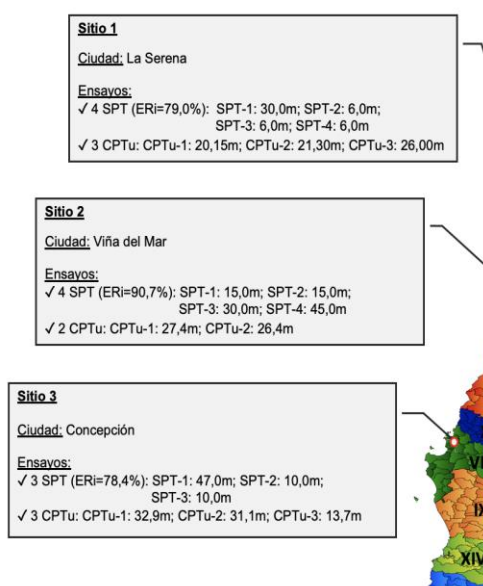


Fig. 1 – Localización e información geotécnica de los sitios utilizados en este estudio

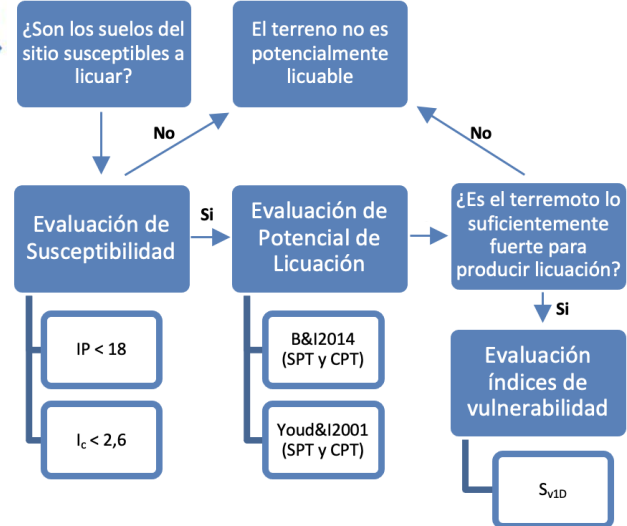


Fig. 2 – Metodología empleada para evaluar la licuación

## 2.4 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 el ensayo utilizado (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  $S_{v1D}$ , 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 (i.e., 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 $S_{v1D}$ SPT [cm]	Valor base $S_{v1D}$ 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,  $a_{m\acute{a}x}$ : 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.  $a_{m\acute{a}x}$  puede presentar variaciones para un mismo sitio dependiendo de cómo se realice este estudio (e.g., 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  $a_{m\acute{a}x}$ .

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,  $K_\sigma$  y  $K_\alpha$ . El nivel freático es por naturaleza variable (e.g., 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,  $\gamma$ : Tiene efectos en el cálculo de CRR,  $K_\sigma$  y  $K_\alpha$ . 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 (e.g., con 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 NSPT, teniendo una gran influencia en su valor final normalizado, y por ende, en el cálculo de CRR. Si bien la norma NCh3364Of2014 (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 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  $\pm 15\%$  (en el caso de  $M_w$ , este parámetro se truncó en un valor máximo de 9.5 para limitarlo a valores realistas), lo que permite visualizar el efecto porcentual que cada variación genera en el índice  $S_{v1D}$ . 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
$a_{m\acute{a}x}$ [g]	$[0,85a_{m\acute{a}x}, 1,15a_{m\acute{a}x}]$	$[0,2, 1,0]$
$M_w$	$[0,85M_w, 1,15M_w]$	$[7,0, 9,5]$
$N_f$ [m]	$[0,85N_f, 1,15N_f]$	$[0, 4]$
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$[0,85\gamma, 1,15\gamma]$	no se considera
$ER_i$ [%]	$[0,85ER_i, 1,15ER_i]$	$[60, 100]$

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 Sv-1D calculado en cada caso se entrega en la Tabla 3 y corresponde al obtenido mediante los parámetros indicados en la Tabla 1.

### 3 Resultados

#### 3.1 Comparación directa de resultados SPT y CPTu

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

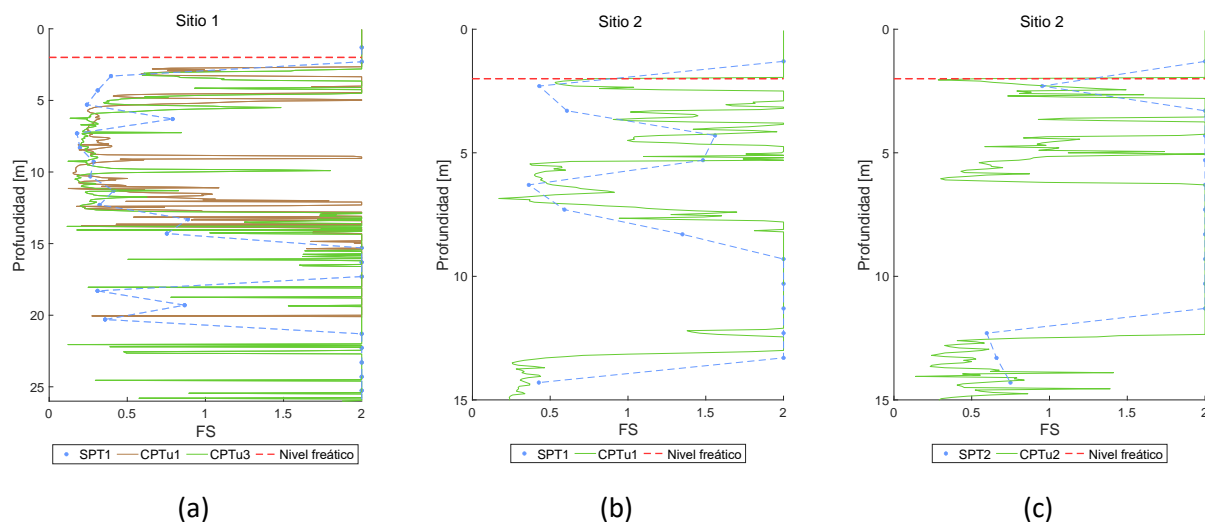


Fig. 3 – FS de licuación en profundidad. Comparativa SPT vs CPTu

Comparando los resultados del Sitio 1 (Fig.3.a) es posible observar que ambos CPTu arrojan resultados similares, reconociendo los mismos estratos licuables entre los 3,0 y 4,0 m ( $FS=0,70$  aprox.), 5,0 a 14,0 m ( $FS=0,30$  aprox.), y 18,0 a 20,0 m ( $FS=0,40$  aprox.). Al comparar esto con 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.).

Ahora, observando los resultados para el Sitio 2 (Fig. 3.b y 3.c) queda en evidencia que CPTu1 y 2 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 entre SPT1 y 2 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 si detecta un punto licuable a partir de los 12,0 m. Ahora, comparando los resultados de CPTu y SPT, para la Fig.3.b. se observa que estos coinciden en la detección los tres estratos licuable. En el caso de la Fig.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 SPT 2 del Sitio 2. En este último caso (Fig.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 metro), 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 SPT, como se puede observar en la Fig.3.a.



Tal como señalan Boulanger e Idriss (2014), Idriss y Boulanger (2004) evaluaron la consistencia entre sus métodos basados en SPT y CPTu. La correlación entre ambos ensayos adoptada por estos autores, para arenas con contenido de finos menor o igual a 5%, empleada para generar métodos de licuación consistentes se indica en la Fig. 4 (ecuación (24) en Idriss & Boulanger, 2004).

Esta relación es utilizada a continuación como referencia para comprender de mejor manera las diferencias observadas en la Fig. 3. Para esto, en la Fig. 4 se grafican junto a esta correlación los pares SPT-CPTu utilizados en la Fig. 3, en términos de  $(N_1)_{60cs}$  y  $q_{c1NCS}$  (resistencias normalizadas para arena limpia equivalente). Para poder comparar los ensayos en profundidad, los datos del CPTu fueron promediados en los rangos de 30 cm asociados a la medición de  $N_2+N_3$  que resulta en el NSPT correspondiente.

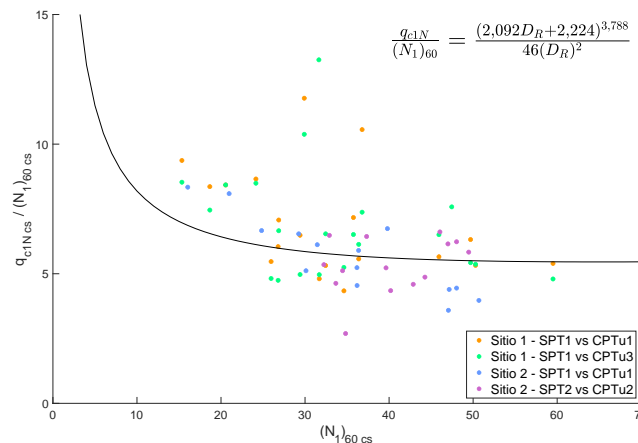


Fig. 4 – Comparación entre pares SPT-CPT<sub>u</sub> junto con correlación utilizada por Idriss y Boulanger (2004) (Idriss & Boulanger, 2004)

Lo primero que puede observarse en la Fig. 4 es que existe una dispersión significativa de los datos, lo que indica un ajuste débil a la curva de referencia teórica y refleja un alto grado de variabilidad en la caracterización geotécnica que se obtiene mediante ambos ensayos. 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 teórica, y para valores superiores a 25 los datos tienden a centrarse en torno esta, 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 (i.e., suelos más sueltos), donde el ensayo CPTu está reconociendo una mayor compacidad que el SPT.

Si bien la Fig. 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 Fig. 4 es que esto está sujeto a una gran variabilidad.

De acuerdo a Idriss y Boulanger (2004) la forma de la curva teórica puede entenderse en parte por las condiciones de drenaje de los ensayos SPT y CPTu, siendo el primero un ensayo marcadamente no drenado (i.e., generando un incremento positivo en la presión de poros para valores bajos de  $(N_1)_{60}$ ), mientras que el segundo un ensayo drenado o parcialmente drenado, dependiendo de la distribución de tamaños de partícula. 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 Fig. 4.

Para la correcta interpretación de la Fig. 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.



### 3.2 Análisis de sensibilidad

En la Fig. 5 se pueden observar los resultados de los análisis de sensibilidad 1 y 2 para los 3 sitios en estudio, definidos en la sección 2.4.

Observando la variación de  $a_{m\acute{a}x}$ , 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; 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  $a_{m\acute{a}x}$  que suelen obtenerse en el país, especialmente en ciudades costeras (i.e., 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 de asentamiento es más sensible al disminuir que aumentar  $M_w$ , a excepción del CPTu del Sitio 3, el cuál arroja una variación similar ante el aumento o disminución de este. Esto nuevamente puede encontrar explicación en que el método para calcular asentamiento tiene un valor límite para factores de seguridad muy bajos, lo que es el caso de este sitio.

Al analizar la variación de la napa freática 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 al aumentarla o disminuirla, ya que tiene variaciones positivas y negativas para ambos límites. Esto se debe a que al estar la napa más profunda 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. También tiene relación con si hay más capas licuables en superficie, como es el caso del Sitio 3, que aumenta el asentamiento en un 38% con la napa 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 a la napa medida 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 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 del sitio y su similar 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 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.



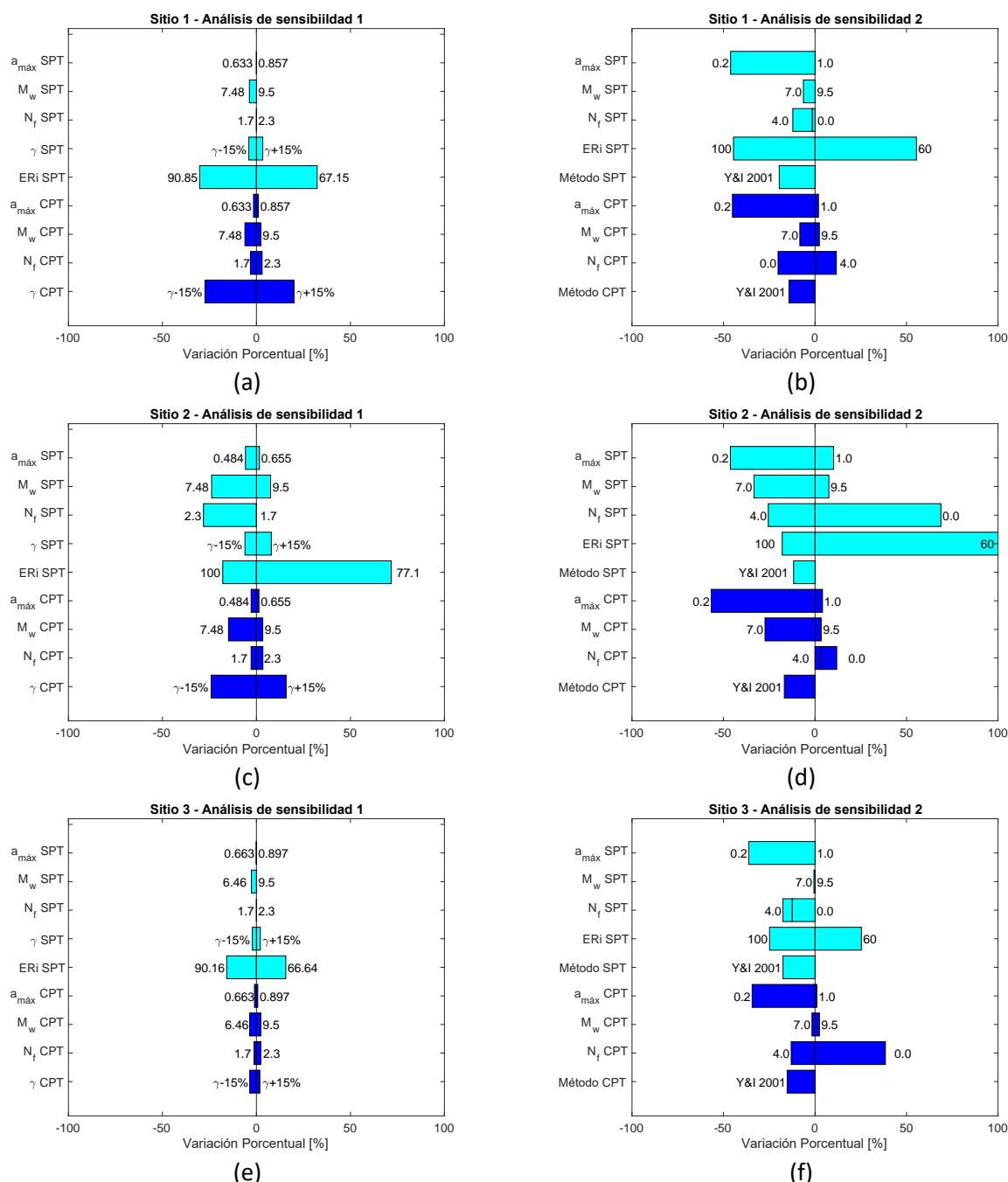


Fig. 5 – Resultados análisis de sensibilidad: (a) Análisis 1, Sitio 1; (b) Análisis 2, Sitio 1; (c) Análisis 1, Sitio 2; (d) Análisis 2, Sitio 2; (e) Análisis 1, Sitio 3; (f) Análisis 2, Sitio 3;

## 4 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 ensayos SPT y CPTu. Si bien no es posible arribar a conclusiones definitivas con esta cantidad de datos, el objetivo del estudio es mostrar 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 B&I2014, tanto en la detección de estratos licuables como en los valores de factor de seguridad obtenidos. Sin embargo, como pudo observarse en la Fig. 3.c, en algunos casos el SPT no es capaz de captar capas licuables que el CPTu si, 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 (Fig. 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 análisis realizados en la Fig.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  $S_{v1D}$ . Tanto para  $a_{m\acute{a}x}$  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  $S_{v1D}$  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 del SPT, lo que subraya la importancia de su medición. Si bien la norma NCh3364Of2014 (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, Youd&I2001 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. Pueden 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 (Decreto N° 61, 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.

## Referencias

- Boulanger, R., & Idriss, I. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of civil & environmental engineering UC Davis.
- Bray, J., & Sancio, R. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(9): 1165-1177.
- Decreto N° 61 (2011). Reglamento que fija el diseño sísmico de edificios. Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile.
- Idriss, I., & Boulanger, R. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings of the 11th ICSDEE & 3rd ICEGE, 32-56.



Idriss, I., & Boulanger, R. (2008). Soil Liquefaction during earthquakes. Earthquake engineering research institute.

Kramer, S. (1999). Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall.

NCh3364 (2014). Geotecnia-Ensayo de Penetración Estándar. Instituto Nacional de Normalización, Chile.

Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Can. Geotech. J., 35: 442-459.

Seed, H., & Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, 97(9): 1249-1273.

Verdugo, R., & González, J. (2015). Liquefaction-induced ground damages during the 2010 Chile earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 79: 280-295.

Youd, T., & Idriss, I. (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 environmental engineering, 297-313.

Zhang, G., Robertson, P., & Brachman, R. (2000). Estimating liquefaction induced ground settlements from CPT for level ground. Canadian Geotechnical Journal, 39: 1168-1180.

**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.*