

Evaluación del potencial de licuación por acción sísmica mediante el uso de modelación numérica

M. G. Sottile, N. Tasso, A. O. Sfriso

msottile@srk.com.ar, ntasso@srk.com.ar, asfriso@srk.com.ar

SRK Consulting Argentina / Universidad de Buenos Aires

RESUMEN: El estado de la práctica para evaluar el potencial de licuación dinámica de una columna de suelo implica el uso de métodos simplificados para determinar y comparar la relación de tensiones cíclicas (CSR) con la relación de resistencia cíclica (CRR). A pesar de haber sido satisfactoriamente utilizados durante años, estos métodos están basados en análisis inversos de pocos casos reales de licuación, y asumen que la generación de presiones de poros y eventual licuación no afectan a la propagación de la onda mecánica en el medio que licúa. En este artículo se presentan los detalles de una modelación numérica que tiene como propósito determinar cuáles son los principales aspectos de los suelos y de los sismos que controlan el fenómeno, y entender por qué los métodos existentes han funcionado. Se presentan más de 6500 análisis dinámicos con modelos de elementos finitos en Plaxis 2D, permutando registros sísmicos reales con diferentes configuraciones estratigráficas y distintas densidades relativas para los materiales licuables, los cuales se caracterizan con el modelo constitutivo PM4Sand. Estos resultados se comparan con simulaciones análogas que emplean una herramienta de respuesta de sitio lineal equivalente, comúnmente utilizada en la práctica para determinar el CSR. Los resultados de ambos análisis se comparan para determinar la influencia de la generación de presión de poros en los valores de PGA en superficie y CSR en el estrato licuable; luego se presenta una evaluación de los principales aspectos geotécnicos y sísmicos que controlan el problema, y finalmente se evalúa la capacidad predictiva de los métodos simplificados.

Palabras clave: Licuación dinámica, análisis de respuesta de sitio, Plaxis 2D, PM4Sand, Python

1 INTRODUCCIÓN

Los suelos granulares sueltos confinados con presiones efectivas moderadas o altas tienden a contraer - reducir su volumen- cuando son sometidos a esfuerzos de corte. La magnitud de dicha contracción se relaciona comúnmente con el parámetro de estado del material [1]. Si el material está saturado, y la aplicación de los esfuerzos ocurre en un breve período -por ejemplo, durante un sismo- el material se deforma a volumen constante y desarrolla exceso de presiones de poros que eventualmente inducen una pérdida instantánea de la rigidez y resistencia al corte del material, en un fenómeno conocido como licuación dinámica.

El estado de la práctica para evaluar el potencial de licuación dinámica de una columna de suelo implica el uso de métodos simplificados para determinar y comparar la relación de tensiones cíclicas (CSR) con la relación de resistencia cíclica (CRR) del material; se define la ocurrencia de la licuación si CSR excede a CRR durante el sismo. Los métodos más utilizados son los propuestos por Seed e Idriss [2], Robertson [3], Youd *et. al* [4] y Boulanger e Idriss [5]. A pesar de haber sido satisfactoriamente utilizados durante años, estos métodos simplificados presentan una serie de limitaciones: i) están basados en análisis inversos de pocos casos reales de licuación donde se observaron hundimientos o eyección de material en superficie; ii) la estimación del CSR incluye coeficientes de corrección por profundidad que presentan una fuerte no linealidad respecto a las propiedades del sitio y del sismo [6], y que asumen que la generación de presiones de poros y eventual licuación no afectan a la propagación de la onda mecánica en el estrato que licúa; iii) el CRR se define indirectamente en función de la densidad relativa a partir de ensayos SPT/CPT e ignora otros aspectos del comportamiento de los suelos [7].

Con el fin de mejorar la comprensión de cuáles son los principales aspectos de los sismos y de los suelos que controlan el fenómeno de licuación, varios autores han desarrollado investigaciones que comprenden: análisis de respuesta de sitio no lineales [6]; análisis probabilísticos con métodos de actualización Bayesiana [8]; y análisis con técnicas de aprendizaje automático [9][10][11]. Los análisis de respuesta de sitio incorporan la influencia de la amplificación de sitio, pero desprecian la generación de presiones de poros y su impacto en la propagación de la onda [7]. Por otra parte, los casos que involucran aprendizaje automático están calibrados a partir de casos que son reales, pero limitados en cantidad.

En este trabajo se presenta una modelación numérica masiva que tiene como propósito reproducir el fenómeno de licuación en una columna 1D, determinar cuáles son los principales aspectos de los suelos y de los sismos que controlan el fenómeno, entender por qué los métodos existentes funcionan, y comprender mejor sus limitaciones.

En primer lugar, se realizaron más de 6500 análisis dinámicos con modelos de elementos finitos en Plaxis 2D, permutando docenas de registros sísmicos reales con diferentes configuraciones estratigráficas y densidades relativas para los materiales licuables, los cuales se caracterizaron con el modelo constitutivo PM4Sand, que incorpora mecánica de suelos de estado crítico, plasticidad con endurecimiento cinemático y rigidez dependiente de la presión efectiva. Con estos ingredientes, este modelo constitutivo permite simular la generación de presiones de poros por carga cíclica, como función del parámetro de estado del material, y su consecuente impacto en la degradación del módulo de rigidez.

Estas simulaciones se repitieron utilizando una herramienta de respuesta de sitio lineal equivalente implementada en la librería Python pySRA, que incorpora técnicas comúnmente utilizadas en la práctica para determinar el CSR. La comparación entre ambos métodos, en términos de PGA (aceleración máxima en superficie) y CSR en el material licuable, permite fundamentar la falta de sustento físico de los métodos CSR|CRR, justificar porqué estos métodos funcionan en la práctica, y comprender mejor cuándo son insuficientes para describir un problema real.

2 REVISION DEL ESTADO DE LA PRACTICA

El potencial de licuación de suelos se analiza generalmente con métodos simplificados, que consisten en gráficos que establecen una frontera límite de licuación o no licuación en el espacio CRR – CSR (Figura 1). Dicha división está basada en juicio ingenieril a partir de análisis inversos de casos reales -pero limitados- de licuación.

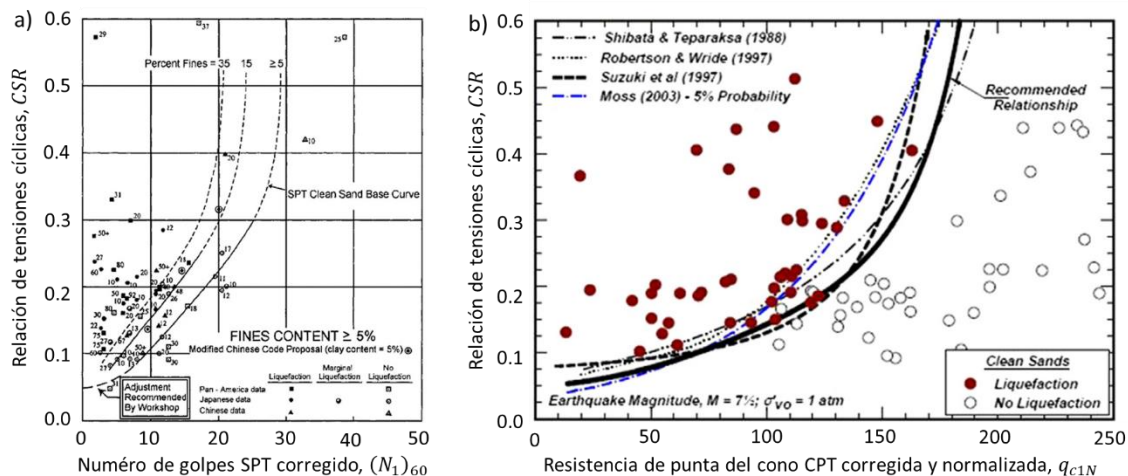


Figura 1. Gráficos de licuación de suelos para sismos de magnitud 7.5. a) Basado en SPT (Youd [4]). b) Basado en CPT Boulanger & Idriss [4]. (Adaptadas de [7]).

El primer método simplificado fue propuesto por Seed e Idriss [2], y posteriormente optimizado por Youd *et. al.* [4]. La resistencia cíclica del suelo se caracteriza a partir de ensayos SPT, normalizando el número de golpes por la tensión vertical efectiva. Complementariamente, Robertson [3] y Boulanger e Idriss [5] realizaron calibraciones análogas a partir de ensayos CPT.

En cuanto a la determinación de la demanda sísmica, caracterizada por la relación de tensiones cíclicas (CSR), todos los métodos usan un procedimiento similar basado en el método simplificado de Seed e Idriss [2] (Figura 2). El CSR se define como el cociente entre la tensión de corte uniforme promedio equivalente (τ_c) durante el sismo y la tensión vertical efectiva previa al sismo (σ'_{v0}) en cada profundidad. Seed & Idriss propusieron estimar τ_c como el 65% de la máxima tensión de corte ocurrida durante el sismo (τ_{max}). A su vez, la distribución de τ_{max} con la profundidad, se puede calcular a partir de: i) una expresión analítica que considera el PGA ocurrido en superficie (a_{max}/g), la tensión vertical total (σ_{v0}) y un coeficiente de corrección por profundidad (r_d); ii) análisis de respuesta de sitio.

Dobry [7] y Youd *et. al.* [4] discuten en detalle las limitaciones asociadas al método simplificado de Seed & Idriss, que se resumen a continuación: i) el factor 0.65 asume que las tensiones cíclicas no uniformes que ocurren durante un sismo pueden ser representadas por un número de ciclos equivalentes de tensiones cíclicas uniformes; ii) los coeficientes de corrección por profundidad presentan una fuerte no linealidad respecto a las propiedades del sitio y del sismo y fueron calibrados para estratos de hasta 25m; iii) las tensiones máximas (τ_{max}) y aceleraciones máximas (a_{max}) en superficie que se usan en los gráficos ignoran el efecto del incremento de presiones de poros y de la licuación en la pérdida de rigidez del estrato que licúa. Esta última resulta ser crítica cuando se utilizan los análisis de respuesta de sitio, ya que es equivalente a asumir que las curvas de G/G_{max} y τ y τ' son las mismas antes, durante y después de la licuación [7]. Por ejemplo, Kramer [13] demostró que la licuación tiene un efecto no despreciable en la amplitud y el contenido de frecuencia de la señal sísmica.

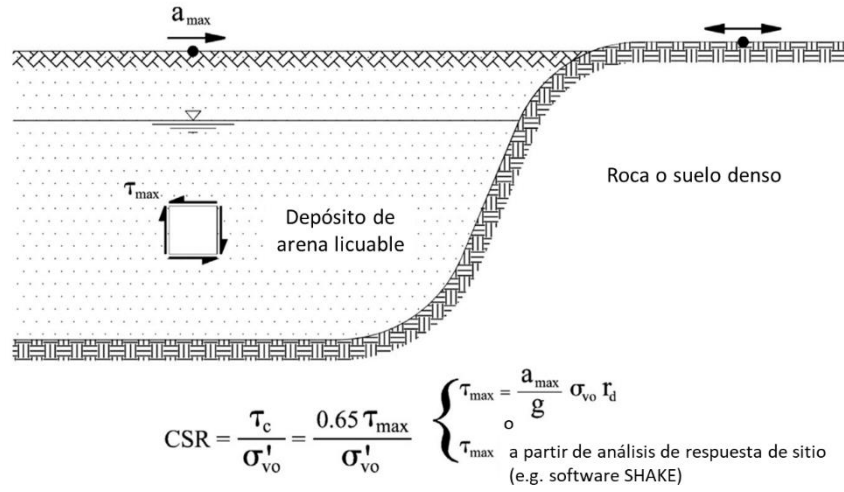


Figura 2. Cálculo de CSR por el método simplificado de Seed & Idriss [2] (Adaptada de [7]).

En la Figura 3 se muestran las aceleraciones horizontales y espectrograma de Stockwell normalizado para la señal medida en superficie en la estación IBR014 durante el sismo de Tohoku; se observa que antes de la licuación, la mayor potencia espectral varía entre 5-10 Hz, mientras que luego de la licuación cae a 1-2 Hz producto de la imposibilidad de los bolsones licuados dentro del terreno de propagar la onda hacia la superficie.

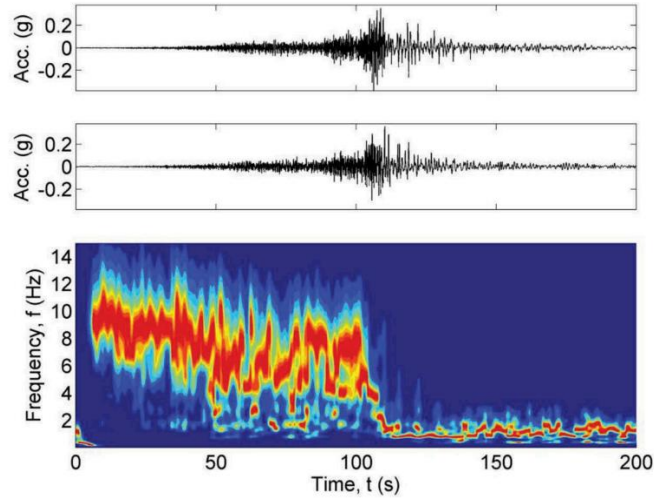


Figura 3. Aceleraciones horizontales en superficie y espectrograma de Stockwell normalizado para la señal medida en la estación IBR014 durante el sismo de Tohoku [13].

3 MODELACIÓN NUMÉRICA

3.1 Estrategia de análisis

La modelación numérica consistió en la ejecución 6552 simulaciones de una columna de suelo, en las que se combinaron registros sísmicos reales con diferentes configuraciones estratigráficas y distintas densidades relativas para los materiales licuables.

En cada simulación se registró la evolución de tensiones de corte (τ_{xy}), deformaciones de corte (γ_{xy}) y la relación de exceso de presión de poros (r_u). Los resultados obtenidos fueron procesados para determinar la ocurrencia de licuación, definida a través de umbrales típicamente utilizados en la literatura [12]: si en algún punto del material licuable $\gamma_{xy} > 3\%$ o $r_u > 0.90$. La generación de los modelos, los cálculos, la obtención y el procesamiento de los resultados se realizó de forma automática mediante un código Python desarrollado al efecto.

Se calcularon las tensiones de corte para compararlas con los valores de CSR obtenidos a partir de los análisis de respuesta de sitio (SRA) que se utilizan comúnmente en la práctica. También se registraron las aceleraciones en superficie para ver el impacto de la generación de presiones de poros -y la eventual licuación- en el PGA en superficie. Los análisis de respuesta de sitio se realizaron con la librería pySRA que emplea formulaciones para la rigidez no lineal del terreno y curvas de degradación de rigidez análogas a las implementadas en Plaxis; la principal diferencia entre los modelos numéricos y los modelos lineal-equivalentes es que estos últimos no consideran el impacto de la generación de presión de poros en la propagación de la onda mecánica a través de la columna de suelo.

Por último, se compararon los resultados de Plaxis y de SRA en términos de PGA y CSR y se efectuó una evaluación independientemente de la influencia de cada aspecto geotécnico y sísmico en la ocurrencia de la licuación, que pretende aportar pruebas para comprender por qué los métodos simplificados han funcionado.

3.2 Modelo numérico en PLAXIS 2D

El modelo numérico y los casos de análisis están inspirados en el trabajo de Bray & Macedo [14]. En este estudio, se modeló dinámicamente una columna de suelo de 20 m de profundidad total, con tres estratos: dos no licuables (HC: superior y HB: inferior), y uno licuable (HL: medio). Los estratos HC y HB tienen una densidad relativa $D_r = 90\%$, mientras que el estrato HL tiene una densidad relativa variable $35 < D_r < 90\%$. El nivel freático se mantuvo fijo en el contacto entre HC y HL. En la Figura 4 se presentan los detalles del modelo numérico.

Las 6552 simulaciones se obtienen a partir de permutar 39 registros sísmicos, 4 espesores del estrato superior HC, 6 espesores del estrato licuable HL, y 7 densidades relativas para el estrato licuable HL. Se utilizaron 40 elementos de 15-nodos para lograr un balance entre la velocidad de cálculo y la propagación correcta de la onda previa a la licuación. La condición de borde inferior es una *compliant base* y en los lados se utilizó una condición de *tied degrees of freedom*, la cual garantiza un mismo campo de desplazamientos y aceleraciones en los bordes izquierdo y derecho del modelo, de manera consistente con una columna de suelo.

Considerando que los registros corresponden a suelos firmes o roca, la señal sísmica, en términos de aceleraciones, fue escalada a la mitad e introducida en la *compliant base* [15]. Se seleccionó un nodo en superficie para estudiar la evolución de a_{max} y 40 puntos de Gauss para evaluar la evolución de τ_{xy} , γ_{xy} y r_u .

3.3 Modelos constitutivos

El valor que incorpora este trabajo respecto a otros existentes es que se utiliza el modelo constitutivo PM4Sand para caracterizar el comportamiento del estrato licuable, y así simular de forma realista la generación de presiones de poros por carga cíclica en función de la densidad relativa del material y su consecuente impacto en la degradación del módulo de rigidez y en la propagación de la onda. Al igual que Bray & Macedo [14], se utilizaron parámetros por defecto propuestos por Ziotopolou & Boulanger [16], y para el parámetro h_{p0} se consideró un promedio de los valores informados por los autores (Figura 4).

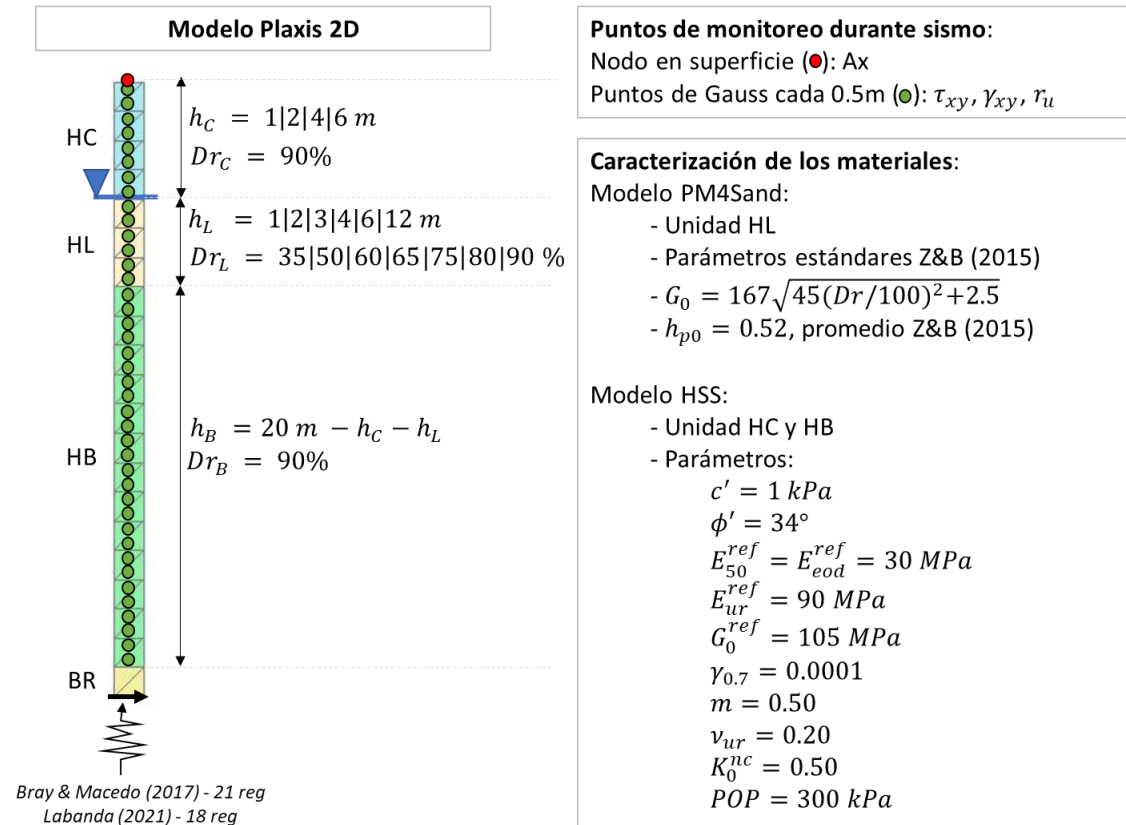


Figura 4. Modelo numérico de la columna de suelo, y parámetros geotécnicos.

Los materiales no licuables se modelaron con el modelo constitutivo Hardening Soil Model with Small-strain Stiffness (HSS). Este modelo puede captar la degradación del módulo de rigidez con deformaciones de corte (o sea, captura amortiguamiento histórico), pero no puede captar la generación de presiones de poros por cargas cíclicas ya que su formulación no cuenta con endurecimiento cinemático. La rigidez de referencia a bajas deformaciones (G_0^{ref}) se determinó utilizando la misma expresión que para PM4Sand en función de la densidad relativa, y los parámetros de rigidez restantes (E_{50}^{ref} , E_{eod}^{ref} , E_{ur}^{ref}) se determinaron a partir de relaciones en cascada utilizadas convencionalmente en la práctica. Durante la simulación se asumió que los materiales caracterizados con HSS no generan presiones de poros. Los parámetros utilizados se muestran en la Figura 4.

3.4 Registros sísmicos

Se utilizaron 39 registros sísmicos medidos en roca o suelo firme obtenidos de la base de datos de PEER NGA-West2; 21 de Bray & Macedo [14] y 18 de Labanda [17]. Con el fin de optimizar los tiempos de cálculo, los sismos fueron recortados simétricamente manteniendo el 96% de la intensidad de Arias (AI); adicionalmente, se utilizó una ventana de Hann en cada extremo de la señal equivalente al 5% de la duración recortada; también se aplicó un filtro de Butterwood de 0.05 Hz, y posteriormente se aplicó la técnica de procesamiento recomendada por el PEER. En la Tabla 1 se resumen las características principales de cada uno de los registros sísmicos empleados: su número de identificación PEER, el nombre del evento, la estación, magnitud, duración, AI, y potencias espectrales integradas entre 0-1 Hz, 0-5Hz y 0-15Hz según Labanda [17].

Tabla 1. Registros sísmicos y sus características principales.

PEER #	Evento	Estación	Mag [-]	D ₂₋₉₈ [s]	Al ₂₋₉₈ [m/s]	PGA [g]	P ₀₋₁ /Pr [-]	P ₀₋₅ /Pr [-]	P ₀₋₁₅ /Pr [-]
1012	Northridge-01	LA 00	6.69	11.3	1.0	0.38	3127	24897	32402
1078	Northridge-01	Santa Susana Ground	6.69	11.3	0.8	0.29	1538	16912	25633
1106	Kobe, Japan	KJMA	6.90	12.3	7.9	0.83	60059	237749	245312
1111	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	6.90	13.0	3.2	0.48	15460	95528	103911
1162	Kocaeli, Turkey	Goynuk	7.51	17.1	0.2	0.14	485	5309	7823
1197	Chi-Chi, Taiwan	CHY028	7.62	19.8	5.7	0.76	40005	169846	185185
125	Friuli, Italy-01	Tolmezzo	6.50	7.1	0.7	0.36	2060	19158	23065
1507	Chi-Chi, Taiwan	TCU071	7.62	26.5	9.1	0.65	16430	188063	289110
1512	Chi-Chi, Taiwan	TCU078	7.62	29.4	5.5	0.45	23777	125356	171435
1612	Duzce, Turkey	Lamont 1059	7.14	19.2	0.4	0.15	515	7496	11721
1618	Duzce, Turkey	Lamont 531	7.14	18.8	0.4	0.16	1027	11418	14062
164	Imperial Val-06	Cerro Prieto	6.53	41.0	1.2	0.17	3728	27354	37787
1787	Hector Mine	Hector	7.13	14.2	1.8	0.33	12507	52724	57669
2111	Denali, Alaska	R109 (temp)	7.90	24.2	0.1	0.11	856	2878	3457
250	Mammoth L-06	Long Valley Dam (ULA)	5.94	9.7	1.4	0.95	5726	32653	40267
265	Victoria, Mexico	Cerro Prieto	6.33	11.6	1.9	0.65	11024	45683	58306
33	Parkfield	Temblor pre-1969	6.19	6.9	0.4	0.36	1076	12119	13598
3750	Cape Mendocino	Loleta Fire Station	7.01	18.8	0.8	0.27	7045	21196	24522
3943	Tottori, Japan	SMN015	6.61	24.4	0.4	0.27	932	8122	11647
407	Coalinga-05	Oil City	5.77	7.0	3.4	0.84	7020	71007	104198
4101	Parkfield-02, CA	Parkfield - Cho 3E	6.00	8.0	1.2	0.80	1311	18508	36826
4132	Parkfield-02, CA	Parkfield - VC 2E	6.00	8.9	0.7	0.37	1786	14428	21405
415	Coalinga-05	Transmitter Hill	5.77	8.0	1.6	1.02	6663	42900	49893
4455	Montenegro, Yug	Herceg Novi - O.S.D. P	7.10	19.1	0.4	0.26	1489	10473	14083
4457	Montenegro, Yug	Ulcinj - Hotel Albatros	7.10	25.9	0.7	0.23	5418	18553	20527
4477	L'Aquila, Italy	GRAN SASSO (Assergi)	6.30	12.6	0.4	0.15	379	6045	11812
448	Morgan Hill	Anderson Dam (D)	6.19	12.3	0.6	0.42	2578	17064	21137
4845	Chuetsu-oki, Jap	Joetsu Oshimaku Oka	6.80	8.5	1.7	0.65	1089	16044	53087
4886	Chuetsu-oki, Jap	Tamati Yone Izumozaki	6.80	20.6	4.7	0.63	24180	135567	154147
5663	Iwate, Japan	MYG004	6.90	23.0	9.0	0.75	8400	78962	275320
568	San Salvador	Geotech Inv Center	5.80	6.0	2.3	0.70	10805	50088	57086
587	New Zealand-02	Matahina Dam	6.60	10.7	0.6	0.28	2630	16528	21136
690	Whittier Nar-01	San Gabriel - E GAve	5.99	9.0	0.8	0.26	5098	19951	24331
6928	Darfield,NZ	LPCC	7.00	18.4	0.7	0.36	1698	8548	19783
753	Loma Prieta	Corralitos	6.93	12.3	2.7	0.64	10422	59318	66095
8158	Christchurch, NZ	LPCC	6.20	5.6	5.5	0.95	3768	57221	168335
830	Cape Mendocino	Shelter Cove Airport	7.01	18.7	0.5	0.23	49	5355	17800
952	Northridge-01	Beverly H - 12520 Mul	6.69	10.1	2.9	0.62	5243	66159	90958
982	Northridge-01	Jensen Filter PAB	6.69	12.2	4.7	0.62	61423	143057	145459

4 RESULTADOS

4.1 Comparación de PGA

La Figura 5 presenta una comparación entre el PGA en superficie obtenido en las simulaciones numéricas y en los análisis SRA; los resultados se dividen entre los casos que no licúan (izquierda) y los que licúan (derecha). Se puede observar que: i) cuando no hay licuación, la dispersión es menor y el PGA numérico es mayor que el del SRA cuando $PGA < 0.5|0.6g$, mientras que lo opuesto ocurre si $PGA > 0.5|0.6g$;

ii) cuando hay licuación, la variabilidad es notoria y no existe una tendencia. Esta última observación parece ratificar la observación de Dobry [7] de que los métodos simplificados que se utilizan carecen de sentido físico, debido a que el PGA estimado en superficie a partir de análisis de SRA no considera el efecto de la licuación en la propagación de la onda. Sin embargo, es importante destacar que en los casos reales la licuación nunca abarca toda la extensión en planta de un estrato, sino que se produce en bolsones, a veces más aislados y a veces más interconectados, por lo que las ondas de corte todavía pueden atravesar el estrato que licúa a través de las zonas que aún no alcanzaron a licuar.

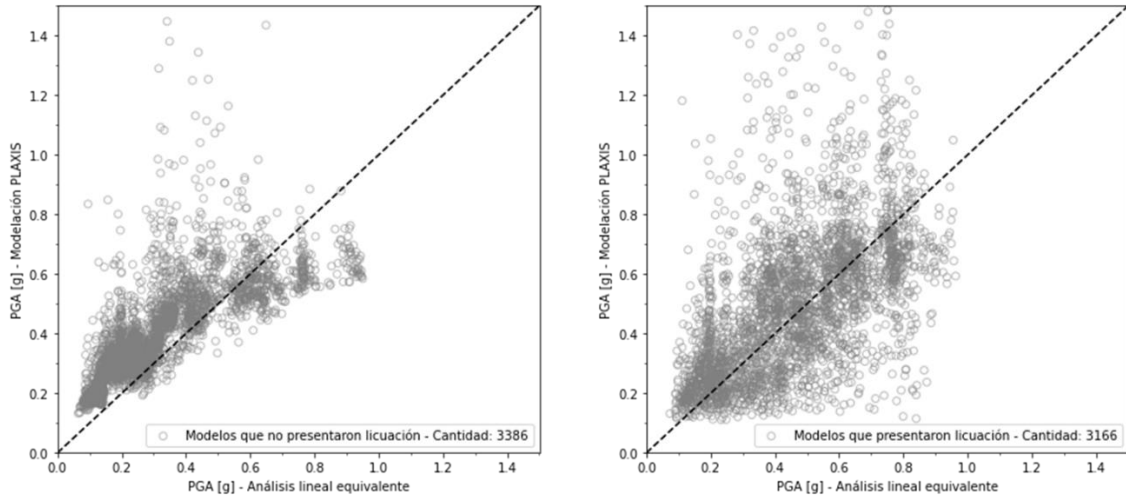


Figura 5. Comparación de PGA en superficie obtenidos en Plaxis vs análisis de respuesta de sitio lineales equivalentes. Casos que no licúan (izquierda). Casos que licuan (derecha).

4.2 Comparación de CSR

La evolución de las tensiones de corte se registró cada 0.5 m en ambos modelos, numérico y SRA. Luego se determinó, para cada profundidad y para cada caso, la máxima tensión de corte (τ_{max}) y se calculó un CSR corregido por magnitud y tensión de confinamiento según [5]:

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_{v0}=1} = (0.65 \cdot \tau_{max}) / (\sigma'_{v0} \cdot MSF \cdot K_{\sigma}) \quad (1)$$

La Figura 6 presenta una comparación entre el CSR obtenido con ambos métodos, para puntos que se encuentran dentro del estrato licuable (HL). Los resultados se dividen entre los casos que no licúan (izquierda) y los que licuan (derecha). Se observa que no hay prácticamente correlación entre ambos métodos, sin importar si ocurrió licuación o no.

Este resultado es importante porque confirma una falta de consistencia sistemática entre el análisis basado en SRA y los resultados que se obtienen en modelos numéricos. Como el modelo constitutivo empleado en los análisis numéricos incorpora prácticamente todas las características relevantes del comportamiento no drenado de los suelos sueltos, puede concluirse que el CSR estimado según métodos simplificados es efectivamente un parámetro índice sin un sustento físico real [7]. Por otra parte, dada la vasta experiencia internacional en el uso de las técnicas SRA y los buenos resultados que se obtienen en la práctica, se hace necesario profundizar la interpretación para comprender por qué la técnica SRA funciona.

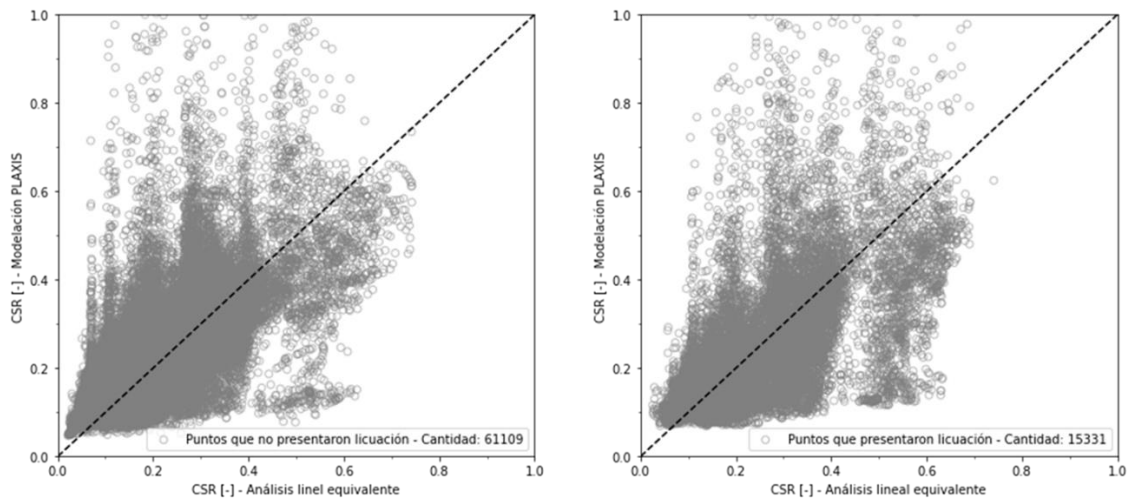


Figura 6. Comparación de CSR obtenidos en Plaxis vs análisis de respuesta de sitio lineales equivalentes. Puntos dentro del estrato licuable (HL). Casos que no licúan (izquierda). Casos que licúan (derecha).

4.3 Efecto de la densidad relativa y la licuación en la dispersión de CSR

La Figura 7 presenta una comparación de CSR -para puntos dentro de HL- entre el análisis numérico y el análisis SRA para casos que no licúan, agrupados según las densidades relativas consideradas para el estrato HL; el propósito es entender su impacto en los resultados. Se puede observar que, para suelos sueltos, $Dr = 35|50\%$, los resultados de SRA muestran CSR más altos que los modelos numéricos; una posible explicación es que, a pesar de no haber licuado, la generación de presión de poros del modelo numérico atenúa las tensiones máximas generadas durante el sismo. Lo contrario ocurre cuando la densidad relativa aumenta; se observa que para $Dr = 75|80|90\%$, el CSR obtenido en la modelación numérica es mayor al del análisis SRA. Otra observación es que, para suelos sueltos, $Dr = 35|50\%$ hay casos de no licuación hasta $CSR = 0.40$.

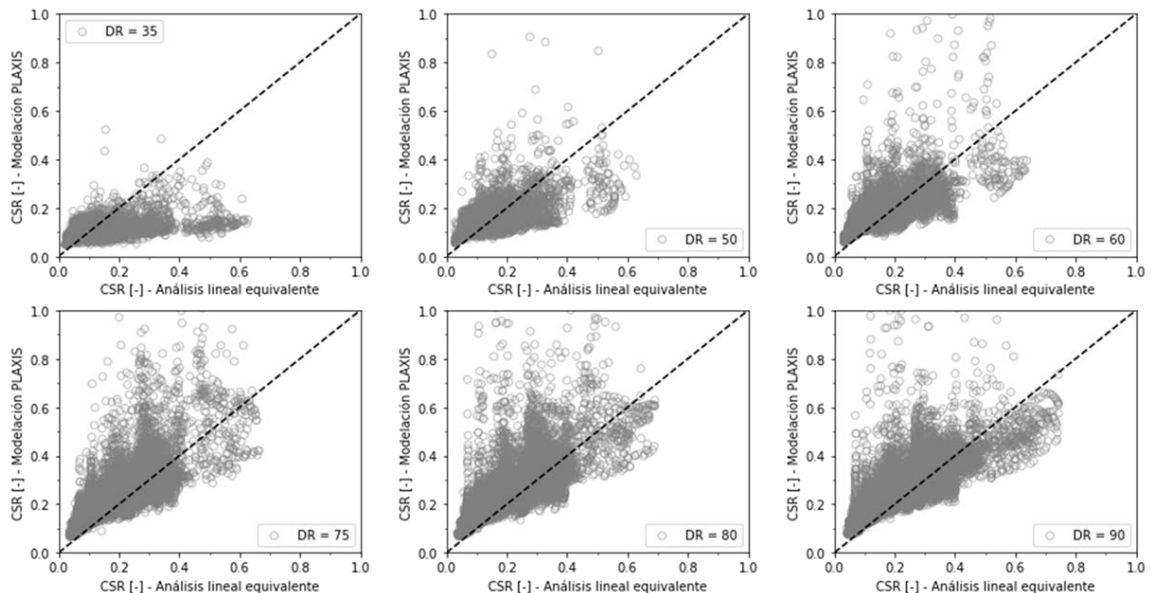


Figura 7. Comparación de CSR obtenidos en Plaxis vs SRA para casos que no licúan. Puntos dentro del estrato licuable (HL). Evaluación del efecto de la densidad relativa del estrato licuable.

De la misma forma, la Figura 8 presenta una comparación de CSR entre el análisis numérico y SRA para los casos que licúan. Una observación interesante es que el CSR necesario para observar licuación va aumentando a medida que se incrementa la densidad relativa; nótese que para $Dr = 35\%$ arrancan en $CSR = 0.05$, para $Dr = 75\%$ aumentan a $CSR = 0.25$ y para $Dr = 90\%$ casi no se observa licuación.

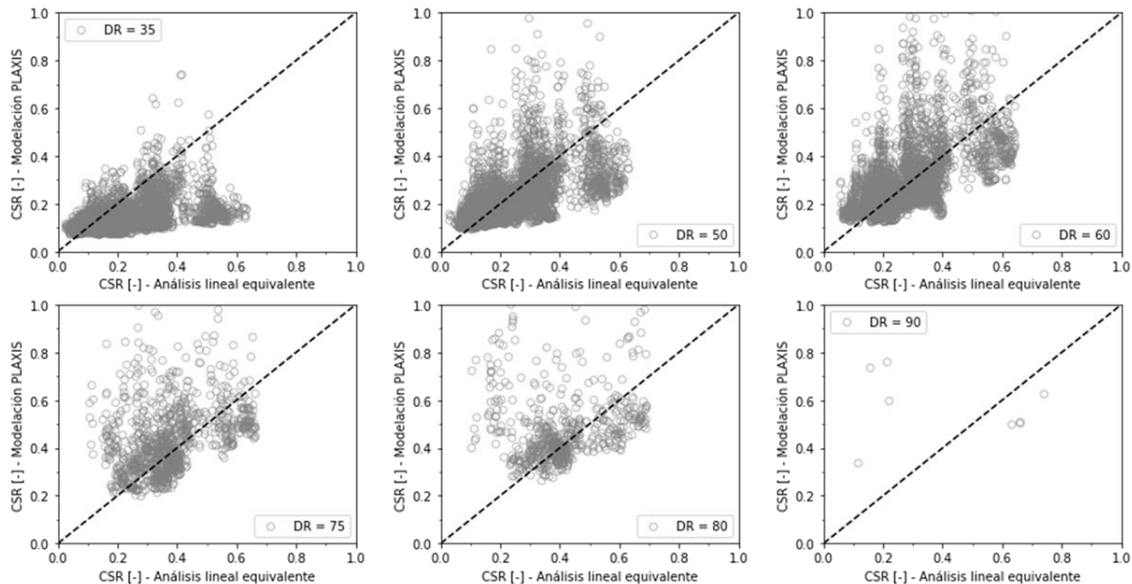


Figura 8. Comparación de CSR obtenidos en Plaxis vs SRA para casos que licúan. Puntos dentro del estrato licuable (HL). Evaluación del efecto de la densidad relativa del estrato licuable.

4.4 Evaluación de principales aspectos que controlan la licuación

La Figura 9 presenta diagramas de caja de las propiedades de los suelos y de los sismos que intervienen en las simulaciones; el propósito es estudiar individualmente la relación entre cada uno de ellos y la ocurrencia de la licuación, y así determinar su importancia.

Entre los aspectos que menor relación tienen con el fenómeno de licuación están: el espesor de HL; el espesor de HC, la magnitud y la duración del sismo. Los aspectos que presentan una mayor relación con la licuación son: la densidad relativa, la intensidad de Arias del sismo, y su potencia espectral, siendo la óptima la que considera la energía a bajas frecuencias (0-1 Hz). Esta relación entre la energía acumulada a baja frecuencia y el fenómeno de licuación está alineada con las conclusiones de Labanda [17]. Sorprendentemente, el PGA en el *outcrop* tiene una variabilidad tal que el cuartil Q3 de no licuación (0.3-0.6g) se superpone con el cuartil Q1 de licuación (0.35-0.6g), y por lo tanto no resulta ser un indicador óptimo para determinar la ocurrencia de la licuación.

4.5 Comparación con el método simplificado

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas se comparan con los gráficos utilizados en los métodos simplificados. Para ello, se convierte la densidad relativa al número de golpes normalizado según [12]: $(N_1)_{60} = 46 Dr^2$. Para el caso de CSR, se consideran aquellos obtenidos a partir de los análisis SRA según las recomendaciones de Dorby [7]; esto se fundamenta en que el método simplificado está calibrado con resultados de análisis SRA que ignoran el efecto de la generación de presiones de poros y su consecuente impacto en la degradación del módulo de rigidez. En definitiva, se intenta explicar por qué los métodos simplificados funcionan.

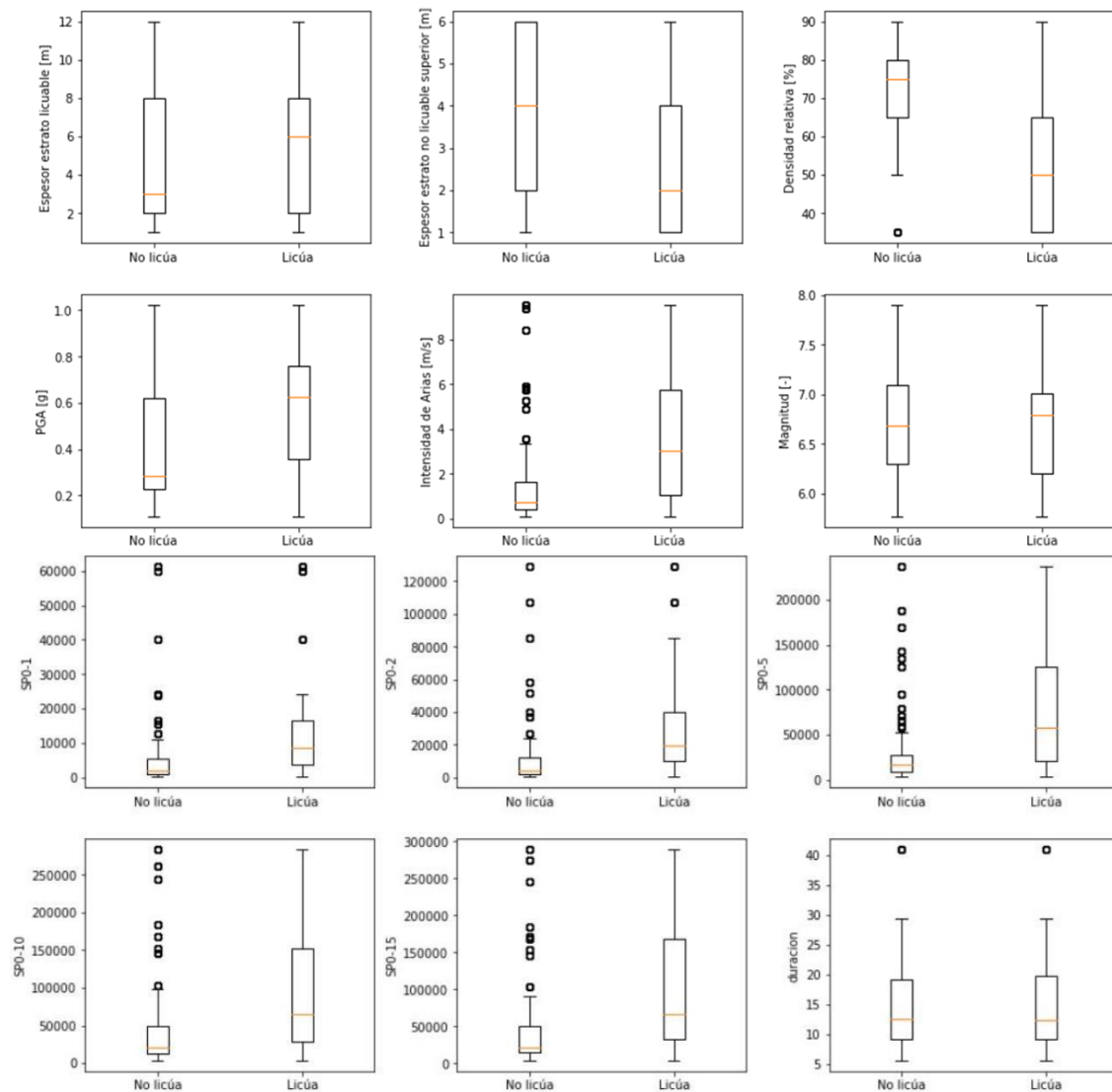


Figura 9. Diagramas de caja. Relación entre aspectos de los suelos y de los sismos con la ocurrencia de la licuación. Nota: los valores de PGA son en el outcrop (superficie de roca/suelo firme; Tabla 1).

Los resultados de las simulaciones numéricas se presentan en términos de probabilidad de ocurrencia de la licuación. Para ello, se cuentan el número de casos de licuación sobre el número de casos totales dentro de un área móvil limitada de $(N_1)_{60}$ y CSR. Luego de trazan contornos de iso-probabilidad.

La comparación se presenta en la Figura 10. Se observa una notable coincidencia entre las curvas de iso-probabilidad obtenidas y la forma y ubicación de la frontera de licuación propuesta por los métodos simplificados basados en SRA. Es interesante observar que la probabilidad de ocurrencia asociada a los casos de licuación reportados por Idriss y Boulanger [12] típicamente se ubica por encima del 15-20%, mientras que los casos de no licuación están por debajo. Por lo tanto, se concluye que las fronteras definidas por los métodos simplificados funcionan, pero quizás son algo conservadoras, ya que pueden existir casos por arriba de ellas con probabilidades altas de no licuar. Claramente, el alcance de este ejercicio numérico no permite ser concluyentes al respecto, ni brinda suficientes elementos como para proponer ajustes a los métodos simplificados que son el estado de la industria.

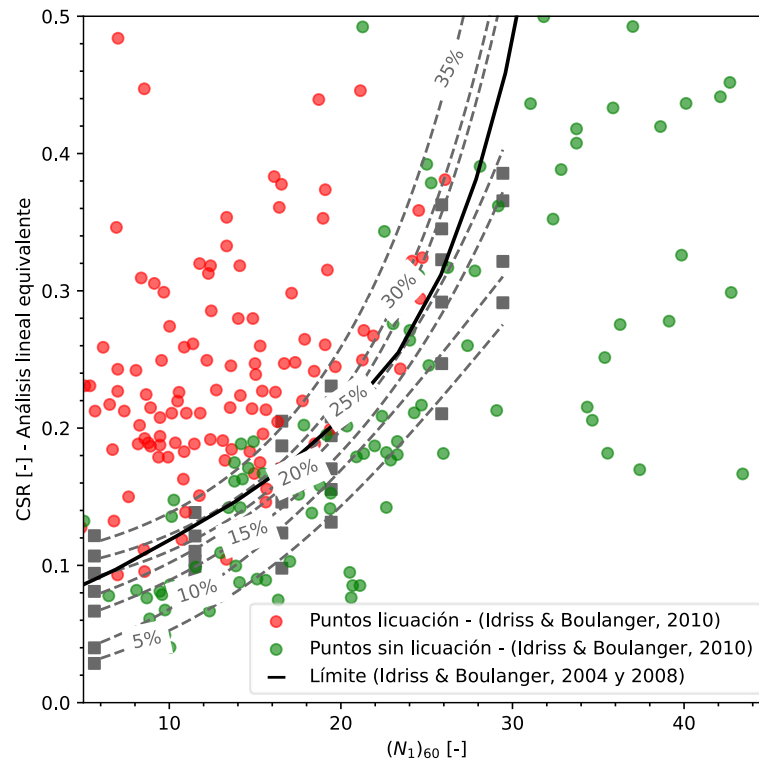


Figura 10. Comparación de resultados de simulaciones con el método simplificado.

5 CONCLUSIONES

Los métodos simplificados utilizados en la práctica para evaluar el potencial de licuación por acción sísmica han demostrado funcionar pero presentan algunas limitaciones: i) están basados en análisis inverso de pocos casos reales de licuación donde se observaron hundimientos o eyección de material en superficie; ii) la estimación del CSR incluye coeficientes de corrección por profundidad presentan una fuerte no linealidad respecto a las propiedades del sitio y del sismo, y asumen que la generación de presiones de poros y eventual licuación no afectan a la propagación de la onda; iii) el CRR se define en función de la densidad relativa a partir de ensayos SPT/CPT e ignora otros aspectos del comportamiento de los suelos.

En este trabajo se realizaron 6552 simulaciones numéricas de una columna de suelo en Plaxis 2D, permutando decenas de registros sísmicos reales con diferentes configuraciones estratigráficas y distintas densidades relativas para los materiales licuables, los cuales se caracterizaron con el modelo constitutivo PM4Sand. Complementariamente, se realizaron análisis de respuesta de sitio para las mismas configuraciones usando la librería de Python pySRA, basada en modelos lineales equivalentes.

La comparación entre los modelos numéricos y los basados en SRA demostró que: i) la licuación tiene un efecto notorio en el PGA que llega a la superficie del modelo, al menos para el caso de la columna 1D; ii) hay una notable diferencia y dispersión en el CSR obtenido por ambos métodos medidos en puntos dentro del estrato licuable, independientemente de si ocurre la licuación o no; iii) los aspectos que menor relación tienen con el fenómeno de licuación son los espesores de los estratos, la magnitud y la duración del sismo; iv) los aspectos que presentan una mayor relación con la licuación son la densidad relativa, la intensidad de arias, y las potencias espectrales, siendo la óptima la que considera la energía a bajas frecuencias (0-1 Hz).

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas se compararon con los gráficos utilizados en los métodos simplificados. Se observa una notable coincidencia con la forma y ubicación de la frontera de licuación de los métodos simplificados. La observación interesante es el valor de la probabilidad de ocurrencia asociado: los casos de licuación reportados por Idriss y Boulanger [12] típicamente se ubican por encima del 15-20%, mientras que los casos de no licuación están por debajo. Por lo tanto, se concluye que las fronteras definidas por los métodos simplificados funcionan, pero son quizás conservadoras, ya que pueden existir casos por arriba de ellas con probabilidades altas de no licuar. El alcance de este ejercicio numérico no permite ser concluyentes al respecto, ni brinda suficientes elementos como para proponer ajustes a los métodos simplificados que son el estado de la industria.

6 REFERENCIAS

- [1] Been K, Jefferies M, *A state parameter for sands*, Géotechnique, 1985, 35(2), pp: 99-112.
- [2] Seed HB, Idriss IM, *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. J Soil Mech Found Div, ASCE 1971;97(No. SM9).
- [3] Robertson P, *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*, Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3), pp: 442-459.
- [4] Youd TL, Idriss IM, Andrus RD, Arango I, Castro G, Christian JT, et al. *Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils*, J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 2001, 127(10), pp:817-33
- [5] Boulanger R, Idriss IM, *CPT-Based Liquefaction Triggering Procedure*, J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 2016, 142(2).
- [6] Cetin KO., Seed RB., Moss RES., Der Kiureghian AK, Tokimatsu K., Harder L.F, Kayen R. *Field Performance Case Histories for SPT-Based Evaluation of Soil Liquefaction Triggering Hazard*, Geotechnical Research Report No. UCB/GT-2000/09, University of California at Berkeley, 2000.
- [7] Dobry R, Abdoun T, *3rd Ishihara Lecture: An investigation into why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 40-56.
- [8] Cetin K, Kiureghian A, *Reliability-Based Assessment of Seismic Soil Liquefaction Initiation*, XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 2001.
- [9] Oommen T, Baise L, Vogel R, *Validation and application of empirical liquefaction models*, J Geotech Geoenviron Eng ASCE, 2010, 136, pp: 1618-1633
- [10] Zhang J, Wang Y, *An ensemble method to improve prediction of earthquake-induced soil liquefaction: a multi-dataset study*, Neural Computing and Applications, 2020.
- [11] Atangana PG, Shen SL, Zhou A, Lyu H, *Evaluation of soil liquefaction using AI technology incorporating a coupled ENN / t-SNE model*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020.
- [12] Idriss, I. M. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- [13] Kramer SL, Greenfield MW, *The use of numerical analysis in the interpretation of liquefaction case histories*, 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2019.
- [14] Bray J, Macedo J, *6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction induced building settlement*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 215-231.
- [15] Vilhar G, Brinkgreve RBJ, Zampich L, *PLAXIS The PM4Sand model*, 2018.
- [16] Ziotopolou K, Boulanger R, *PM4Sand (Version 3): A Sand Plasticity Model For Earthquake Engineering Applications*, Center For Geotechnical Modeling, Report UCD/CGM-15/01, 2015.
- [17] Labanda NA, Sottile MG, Cueto IA, Sfriso AO, *Screening of seismic records to perform time-history dynamic analyses of tailings dams: A power-spectral based approach*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021.