

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ENSAYOS SPT Y CPT_u
PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN
EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**JOSÉ ANTONIO BARRANTES SÁENZ
ID: 0000-0002-8281-2904**

ASESOR

**Dr. ZENÓN AGUILAR BARDALES
ID: 0000-0003-4710-3333**

LIMA – PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Barrantes Sáenz, José Antonio

jbarrantess@uni.pe

(+51) 974 610 729

DEDICATORIA:

A mi mama Mimi, a Sandra y a Gabi por siempre estar a mi lado.

A mis abuelos Abel y Veneranda por el apoyo constante y el amor incondicional que siempre me han brindado.

A Daysi y a Lucho por haberme apoyado incondicionalmente durante mis años de estudiante universitario.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Miriam y a mis hermanas Alexandra y Gabriela por brindarme su amor y cuidado incondicional durante toda mi vida y siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas. Las amo y todo lo que he logrado ha sido gracias a ellas.

A mis abuelos Veneranda y Abel y a mis tios Dayysi y Luis, por haberme apoyado durante mi etapa universitaria en Lima. Ellos me han brindado su cariño y afecto a lo largo de los años.

A mi asesor el Dr. Zenón Aguilar Bardales, por su paciencia, consejos y enseñanzas las cuales me han ayudado para ser un mejor ingeniero geotécnico. Le agradezco enormemente por la confianza depositada en mí.

A mi gran amigo Luis Vergaray, por haberme alentado a desarrollarme como ingeniero geotécnico. Gracias por enseñarme a disfrutar de esta rama.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por la gran calidad en las enseñanzas que imparten los docentes. También por el gran capital humano que representa su alumnado.

A todas las personas que han contribuido en el desarrollo de este trabajo. A Juan Tarazona por haberme apoyado en la parte sísmica del presente documento, a Raúl Malacas por el apoyo con parte de los anexos, a Goyo Cisneros por haberme brindado documentación acerca de licuación de suelos, a Hugo Flor Cunza por las enseñanzas en metodología, a mis colegas de ZER Geosystem Perú S.A.C. por el apoyo durante el desarrollo de la presente investigación.

ÍNDICE

Resumen	3
Abstract	5
Prólogo	7
Lista de tablas	9
Lista de figuras	10
Capítulo I: Introducción	14
1.1 Antecedentes	15
1.2 Problemática	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	19
2.1 El fenómeno de licuación de suelos	19
2.2 Comportamiento geotécnico de suelos arenosos saturados	20
2.2.1 Cargas monotónicas	20
2.2.2 Cargas cíclicas	22
2.3 Categorías de licuación	24
2.3.1 Licuación por flujo	24
2.3.2 Licuación cíclica	25
2.3.3 Movilidad Cíclica	25
2.4 Factores que influyen en la licuación cíclica de suelos arenosos	27
2.4.1 Sismicidad	27
2.4.2 Condiciones geológicas e historia	27
2.4.3 Densidad relativa y relación de vacíos	28
2.4.4 Tipo de suelo	29
2.4.5 Contenido de finos	30
2.4.6 Presencia de nivel freático	31
2.5 Consecuencias del fenómeno de licuación	31
2.5.1 Desplazamiento Lateral	31
2.5.2 Fallas por flujo	32
2.5.3 Pérdida de resistencia cortante del terreno y asentamientos	32
2.5.4 Volcanes de arena	33
2.6 Ocurrencia de licuación registrada en el Perú	33
Capítulo III: Metodologías simplificadas para la evaluación del potencial de licuación en base a ensayos de campo	35
3.1 Ensayos de campo	35
3.1.1 Ensayo de Penetración Estandar (SPT)	35
3.1.2 Ensayo de Penetración de Piezocono (CPTu)	37
3.2 Relación de esfuerzo cíclico (CSR)	39
3.3 Relación de esfuerzos resistentes (CRR)	39

3.3.1	Estimación mediante ensayos SPT	40	
3.4	Evaluación del potencial de licuación	44	
3.4.1	Estimación mediante ensayos CPTu	45	
3.5	Factores de corrección	48	
3.5.1	Factor de Escala de Magnitud del Sismo (MSF)	48	
3.5.2	Factor de Corrección por Confinamiento ($K\sigma$)	49	
3.5.3	Factor de Corrección por Esfuerzos Cortantes Estáticos ($K\alpha$)	51	
3.5.4	Consideraciones adoptadas para el presente trabajo	52	
3.6	Estimación del índice de potencial de licuación	53	
Capítulo IV: Evaluación del potencial de licuación aplicado en la costa norte del			
Perú		56	
4.1	Generalidades	56	
4.1.1	Geología local de la zona de estudio	56	
4.1.2	Sismicidad	57	
4.2	Exploraciones geotécnicas	60	
4.2.1	Ensayos de Penetración Estandar (SPT)	60	
4.2.2	Ensayos de Penetración de Cono CPTu	61	
4.2.3	Descripción de la estratigrafía de la zona de estudio	61	
4.3	Estimación del potencial de licuación en la zona de estudio	62	
4.3.1	Estimación del potencial de licuación empleando ensayos SPT	63	
4.3.2	Estimación del potencial de licuación empleando ensayos CPTu	67	
Capítulo V: Análisis y discusión de resultados			70
5.1	Análisis de los resultados de los ensayos SPT	70	
5.1.1	Metodología de Youd e Idriss (2001)	70	
5.1.2	Metodología de Boulanger e Idriss (2014)	72	
5.1.3	Comparación entre metodologías	75	
5.2	Análisis de los resultados de los ensayos CPTu	79	
5.2.1	Metodología de Robertson (2009b)	79	
5.2.2	Metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016)	80	
5.2.3	Comparación entre metodologías	81	
5.3	Comparativa de resultados entre ensayos SPT y CPTu	86	
5.4	Comentarios adicionales	88	
Conclusiones		91	
Recomendaciones		94	
Referencias bibliográficas		95	
Anexos		102	

RESUMEN

Varias ciudades y obras importantes de la zona costera del Perú se encuentran cimentadas sobre suelos potencialmente licuables, lo cual las hace propensas a sufrir graves daños económicos y sociales durante la ocurrencia de un evento sísmico. Debido a esto, el estudio e identificación de suelos licuables en el Perú es importante.

A fin de caracterizar el potencial de licuación de un suelo se suele emplear metodologías simplificadas desarrolladas a partir de data histórica basadas en ensayos de campo, principalmente SPT y CPTu. La facilidad de aplicación e implementación de estos métodos ha hecho posible realizar la caracterización e identificación de zonas potencialmente licuables en diversos proyectos realizados en el Perú de forma rápida y económica. Sin embargo, debido a la gran variedad de metodologías, existe la posibilidad de obtener resultados completamente diferentes al momento de estudiar un mismo perfil de suelo, lo cual genera incertidumbres al momento de desarrollar proyectos civiles.

A fin de estudiar las diferencias entre las metodologías más empleadas en el medio peruano, en la presente investigación se ha desarrollado un análisis comparativo entre metodologías simplificadas para ensayos SPT y CPTu que han sido ejecutados en una zona de estudio ubicada en la costa norte del Perú. Para cada uno de estos ensayos se ha realizado una revisión de dos (02) metodologías para la estimación del potencial de licuación. Además, se ha presentado la sismicidad histórica de la zona de estudio con la finalidad de establecer dos (02) escenarios sísmicos de análisis, los cuales han sido complementados con las recomendaciones de la normativa vigente en el Perú.

Los resultados del análisis muestran que las metodologías que emplean ensayos SPT dan resultados prácticamente iguales, debido a que las curvas de licuación de las metodologías analizadas prácticamente ajustan la data de una forma muy semejante. Sin embargo, estos resultados se encuentran sometidos a incertidumbres relacionadas a la ejecución del ensayo en campo, sobre todo la medición de energía del martillo la cual influye directamente en la estimación del potencial de licuación.

Por otro lado, la estimación del potencial de licuación mediante ensayos CPTu presenta ciertas variaciones debido a diferencias entre metodologías, pues cada una de estas ha aplicado una base de datos histórica actualizada hasta la fecha de su desarrollo siendo la más reciente la que mayor data presenta y por lo tanto tiene una mejor aproximación. Sin embargo, a diferencia del ensayo SPT, se tiene

que el ensayo CPTu presenta una mejor consistencia en la medición de resultados ya que brinda un perfil continuo del suelo de análisis. Esto también se verifica con investigaciones desarrolladas a nivel internacional.

Del análisis y las comparativas realizadas, se encuentra que las metodologías que utilizan el ensayo SPT son muy dependientes de la calidad de la información generada en campo. Mientras que los métodos que utilizan datos del ensayo CPTu, son más consistentes, en especial los propuestos por Idriss y Boulanger (2014, 2016), que han sido verificados con data histórica de sitios donde se ha observado la ocurrencia del fenómeno de licuación.

Por último, se brindan comentarios acerca de lo estipulado por la normativa vigente con respecto al tema de licuación de suelos. Y además se menciona puntos a mejorar y desarrollar en futuras investigaciones a fin de comprender mejor el fenómeno de licuación en la zona costera del Perú.

ABSTRACT

Several cities and important works in the coastal area of Peru are founded on potentially liquefiable soils, which makes them prone to suffer serious economic and social damage during the occurrence of a seismic event. Due to this, the study and identification of liquefiable soils in Peru is important.

In order to characterize the liquefaction potential of a soil, simplified methodologies developed from historical data based on field tests are usually used, mainly SPT and CPTu. The ease of application and implementation of these methods has made it possible to quickly and economically characterize and identify potentially liquefiable zones in various projects carried out in Peru. However, due to the great variety of methodologies, there is the possibility of obtaining completely different results when studying the same soil profile, which generates uncertainties when developing civil projects.

In order to study the differences between the most used methodologies in the Peruvian environment, in this research a comparative analysis has been developed between simplified methodologies for SPT and CPTu tests that have been executed in a study area located on the northern coast of Peru. . For each of these tests, a review of two (02) methodologies for estimating the liquefaction potential has been carried out. In addition, the historical seismicity of the study area has been presented with the purpose of establishing two (02) seismic analysis scenarios, which have been complemented with the recommendations of the current regulations in Peru.

The results of the analysis show that the methodologies that use SPT tests give practically the same results, because the liquefaction curves of the analyzed methodologies practically fit the data in a very similar way. However, these results are subject to uncertainties related to the execution of the field test, especially the measurement of hammer energy which directly influences the estimation of the liquefaction potential.

On the other hand, the estimation of the liquefaction potential through CPTu tests presents certain variations due to differences between methodologies, since each of these has applied a historical database updated up to the date of its development, with the most recent being the one with the most data. and therefore has a better approximation. However, unlike the SPT test, the CPTu test presents better consistency in the measurement of results since it provides a continuous profile of the analysis soil. This is also verified with research carried out internationally.

From the analysis and comparisons carried out, it is found that the methodologies that use the SPT test are very dependent on the quality of the information generated in the field. While the methods that use data from the CPTu test are more consistent, especially those proposed by Idriss and Boulanger (2014, 2016), which have been verified with historical data from sites where the occurrence of the liquefaction phenomenon has been observed.

Finally, comments are provided about what is stipulated by current regulations regarding the issue of soil liquefaction. And points to improve and develop in future research are also mentioned in order to better understand the liquefaction phenomenon in the coastal zone of Peru.

PRÓLOGO

En el Perú se ha registrado grandes pérdidas sociales y económicas durante la ocurrencia de terremotos de gran magnitud dado que la infraestructura de muchas ciudades se encuentra cimentada sobre suelos licuables, los cuales pierden su resistencia durante el movimiento sísmico. Debido a estos antecedentes, en el Perú se suelen realizar estimaciones del potencial de licuación con el fin de identificar los suelos potencialmente licuables. Estas estimaciones se basan principalmente en metodologías simplificadas semi empíricas que hacen uso de ensayos SPT. Sin embargo, este ensayo es muy dependiente de la calidad de la información obtenida en campo, siendo la más relevante la medición de energía del martillo que afecta directamente a la estimación del potencial de licuación. Por otro lado, recientemente se viene empleando con mayor frecuencia el ensayo CPTu debido a que no se encuentra sometido a muchas de las incertidumbres que presenta el ensayo SPT y que además presenta una información continua del perfil de suelo.

Existen diferentes metodologías simplificadas para la estimación del potencial de licuación basadas en ensayos SPT y CPTu. Sin embargo, es posible obtener resultados completamente diferentes al momento de analizar un mismo perfil de suelo, lo que genera incertidumbres al momento de determinar si un perfil de suelo es potencialmente licuable o no. Esto puede inducir a errores en el diseño de las cimentaciones de obras civiles proyectadas sobre terrenos potencialmente licuables.

Con la finalidad de poder estudiar lo mencionado, la presente investigación desarrolla un análisis comparativo de potencial de licuación para una zona representativa de la costa norte del Perú. El potencial de licuación se ha obtenido aplicando metodologías semi empíricas basadas en ensayos SPT y CPTu. Para poder lograr dicho fin, la presente tesis se ha desarrollado en los capítulos que se resumen a continuación:

El Capítulo I presenta un resumen de investigaciones orientadas al estudio del fenómeno de licuación a nivel nacional e internacional. Además, se presenta la problemática y los retos que esta conlleva. Por último, se presenta los objetivos a desarrollar en el presente trabajo.

El Capítulo II presenta un breve marco teórico sobre el fenómeno de licuación de suelos. Se habla acerca del comportamiento de los suelos saturados y se menciona a los factores que influyen en el fenómeno de licuación cíclica de suelos arenosos. También se habla acerca de las consecuencias de la licuación de

suelos sobre el terreno y la ocurrencia de daños registrada en el Perú durante la ocurrencia de eventos de gran magnitud.

El Capítulo III se detalla las metodologías simplificadas que se usan para la evaluación del potencial de licuación en la presente investigación. Se menciona brevemente acerca de los fundamentos de ensayos de campo SPT y CPTu que sirvieron como base para el desarrollo del presente trabajo. Se mencionan conceptos como la relación de esfuerzos cíclicos y la relación de esfuerzos resistentes. También se presenta el procedimiento para la estimación del índice del potencial de licuación.

El Capítulo IV se enfoca en desarrollar la evaluación del potencial de licuación en la zona de estudio que se encuentra ubicada en la costa norte del Perú. Se repasa brevemente la sismicidad histórica de la zona y se establecen los escenarios de análisis para la estimación del potencial de licuación. También se detalla la cantidad de ensayos SPT y CPTu a emplear y se indica brevemente la estratigrafía del subsuelo. A partir de esta información se procede a estimar el índice del potencial de licuación o LPI de los ensayos ejecutados a lo largo de la zona de estudio.

El Capítulo V desarrolla el análisis y discusión de los resultados obtenidos previamente. Se realiza una comparativa entre las metodologías adoptadas y los ensayos SPT y CPTu y se procede a seleccionar el ensayo y la metodología más adecuada para la estimación del potencial de licuación en la zona de estudio. Esto se ha realizado estudiando las diferencias entre las formulaciones de cada metodología.

Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones del estudio, las cuales están asociadas a los objetivos planteados en este documento. También, se brindan comentarios acerca de las recomendaciones brindadas por la normativa vigente con respecto al tema de licuación de suelos.

Asesor.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Comparación entre licuación por flujo, licuación cíclica y movilidad cíclica	26
Tabla 2.2: Susceptibilidad a la licuación de depósitos de suelos durante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud	27
Tabla 2.3: Susceptibilidad a la licuación de un suelo en función de la aceleración máxima a nivel de superficie y a la densidad relativa.	29
Tabla 3.1: Comparación de los ensayos presentados.....	38
Tabla 3.2: Diversas ecuaciones empleadas para la estimación del r_d	39
Tabla 3.3: Correcciones para el equipo SPT.....	43
Tabla 3.4: Eficiencias de los martillos SPT alrededor del mundo	44
Tabla 3.5: Clasificación del tipo de comportamiento del suelo en función del I_c	46
Tabla 3.6. Diversas ecuaciones empleadas para la estimación del MSF.	49
Tabla 3.7. Valores recomendados para f	50
Tabla 3.8: Riesgo de licuación en el terreno según el potencial de licuación ..	54
Tabla 3.9: Clasificación del potencial de licuación	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Trayectorias para cargas monotónicas en condiciones drenadas y no drenadas, junto con la línea de estado crítico en un plano semilogarítmico $e-p'$	20
Figura 2.2: Respuesta monotónica en un ensayo triaxial CD de una a) arena densa (DR=100%) y b) arena suelta (DR=38%) obtenidas del río Sacramento	21
Figura 2.3: Ilustración esquemática del comportamiento no drenado en arenas. (a) Comportamiento esfuerzo deformación, (b) Trayectoria de esfuerzos efectivos	22
Figura 2.4: Trayectorias de esfuerzos tanto para cargas monotónicas y cíclicas en una arena.....	23
Figura 2.5: Esquema del comportamiento monotónico no drenado de una arena contractiva bajo un ensayo triaxial.....	24
Figura 2.6: Granulometría de algunos suelos que han licuado.....	30
Figura 2.7: Desplazamiento lateral ocurrido en el terremoto de Kocaeli de 1999	31
Figura 2.8: Deslizamiento en el talud aguas arriba en la presa de San Fernando después del sismo de San Fernando 1971	32
Figura 2.9: Asentamiento producto de la licuación del terreno.....	32
Figura 2.10: Volcanes de arena observados en la ciudad de Moyobamba	33
Figura 2.11: Mapa de áreas de licuación en el Perú	34
Figura 3.1: Secuencia de penetración del muestreador de caña partida durante la ejecución del ensayo SPT.....	36
Figura 3.2: Procedimientos y componentes del ensayo CPTu	38
Figura 3.3: Carta normalizada para la determinación del tipo de comportamiento del suelo (SBT). Las líneas gruesas representan un mismo valor de I_c	45
Figura 3.4: Curvas recomendadas para la estimación de K_σ en la práctica ingenieril.....	50
Figura 3.5: Valores recomendados para K_α para esfuerzos efectivos de confinamiento menores a 3 tsf o 2.8 atmosferas.....	52
Figura 3.6: Proceso de integración para la estimación del LPI.....	54
Figura 4.1: Zonas sísmicas según la Norma E.030.....	59

Figura 4.2: Recopilación de resultados de los ensayos SPT.....	60
Figura 4.3: Recopilación de resultados de los ensayos CPTu.....	61
Figura 4.4: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – Ce = 0.50 (Mínimo).	64
Figura 4.5: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – Ce = 0.75 (Intermedio).	65
Figura 4.6: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – Ce = 1.00 (Máximo).	65
Figura 4.7: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – Ce = 0.50 (Mínimo).	66
Figura 4.8: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – Ce = 0.75 (Intermedio).	66
Figura 4.9: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – Ce = 1.00 (Máximo).	67
Figura 4.10: Estimación del LPI a partir de ensayos CPTu – Escenario 01.....	68
Figura 4.11: Estimación del LPI a partir de ensayos CPTu – Escenario 02.....	68
Figura 5.1: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 0.50 - Metodología de Youd e Idriss.	70
Figura 5.2: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 0.75 – Metodología de Youd e Idriss.	71
Figura 5.3: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 1.00 - Youd e Idriss.	71
Figura 5.4: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 0.50 - Metodología de Youd e Idriss.	71
Figura 5.5: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 0.75 - Metodología de Youd e Idriss.	72
Figura 5.6: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 1.00 - Metodología de Youd e Idriss.	72
Figura 5.7: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 0.50 - Metodología de Boulanger e Idriss.	73
Figura 5.8: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 0.75 - Metodología de Boulanger e Idriss.	73
Figura 5.9: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 CE= 1.00 - Metodología de Boulanger e Idriss.	73

Figura 5.10: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 0.50 - Metodología de Boulanger e Idriss.....	74
Figura 5.11: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 0.75 - Metodología de Boulanger e Idriss.....	74
Figura 5.12: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 CE= 0.75 - Metodología de Boulanger e Idriss.....	74
Figura 5.13: Comparación de valores de (N1)60-CS – CE= 0.50.....	76
Figura 5.14: Comparativa de valores de (N1)60-CS – CE= 0.75.....	76
Figura 5.15: Comparativa de valores de (N1)60-CS – CE= 1.00.....	77
Figura 5.16: Representación gráfica de curvas de licuación, incluyendo casos históricos	77
Figura 5.17: Representación gráfica curvas de licuación.	78
Figura 5.18: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 01 – Metodología de Robertson	79
Figura 5.19: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 02 – Metodología de Robertson	79
Figura 5.20: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 01 – Metodología de Boulanger e Idriss	80
Figura 5.21: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 02 – Metodología de Boulanger e Idriss	81
Figura 5.22: Comparativa entre valores de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$	82
Figura 5.23: Comparativa entre las curvas de licuación de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$	83
Figura 5.24: Comparativa entre valores de CSR* de todos los ensayos CPTu– Escenario 01.....	84
Figura 5.25: Comparativa entre valores de CSR* de todos los ensayos CPTu– Escenario 02.....	84
Figura 5.26: Representación gráfica curvas de licuación de la metodología presentada para la metodología de Robertson	85
Figura 5.27: Representación gráfica curvas de licuación de la metodología presentada en la metodología de Boulanger e Idriss	85
Figura 5.28: Resultados del LPI empleando ensayos CPTu	86
Figura 5.29: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una CE igual a 0.50	87

Figura 5.30: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una CE igual a 0.75	87
Figura 5.31: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una CE igual a 1.00	87

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El territorio peruano se encuentra ubicado en una zona que presenta una alta sismicidad. Es bastante común y esperable que cada cierto tiempo sucedan eventos sísmicos de gran magnitud que ocasionan grandes pérdidas económicas y sociales. Durante la ocurrencia de estos eventos, suele encontrarse también suelos que han sufrido licuación y que han generado daños considerables a la infraestructura de las ciudades que han sido construidas sobre dichos suelos. En ciudades costeras como Chimbote, Tambo de Mora, Pisco, Trujillo se ha registrado grandes daños durante eventos sísmicos de gran intensidad debido a que gran parte de las edificaciones y la infraestructura de dichas ciudades fueron cimentadas sobre terrenos licuables. Dicho fenómeno ocasiona la pérdida de la capacidad portante del terreno y la generación de grandes deformaciones generalmente en depósitos de suelo arenosos saturados de compacidad suelta.

A nivel mundial, la licuación de suelos viene siendo estudiada a detalle mediante ensayos de laboratorio que tratan de replicar las condiciones in situ de un suelo o un material licuable. A pesar de ser la alternativa más adecuada, en el estado de la práctica el costo de replicar dichos ensayos junto con la implementación tecnológica requerida es muy elevado. Esto sobre todo si lo comparamos con el presupuesto destinado a expedientes de suelos de obras civiles, el cual es generalmente bastante limitado.

Como alternativa a los ensayos de laboratorio, desde hace varias décadas se ha desarrollado diversas metodologías simplificadas para la estimación del potencial de licuación de un suelo. Dichas metodologías se basan en mediciones de ensayos de campo tales como El Ensayo de Penetración Estándar o SPT, el Ensayo de Penetración de Piezocono o CPTu, el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales o MASW, etc. De estos, el ensayo SPT es el más difundido en el medio peruano, mientras que el ensayo CPTu presenta resultados más consistentes a comparación del SPT (Jefferies y Davies, 1993) y además está siendo recomendado por diversas instituciones debido a su versatilidad (Arnold et al., 2023).

La facilidad de aplicación e implementación de los métodos simplificados ha hecho posible realizar la caracterización e identificación de zonas potencialmente

licuables en diversos proyectos realizados en nuestro país de forma rápida y económica. Esto se ve reflejado en la normativa peruana, la cual brinda recomendaciones para la caracterización de suelos licuables empleando métodos simplificados.

Como se ha mencionado, existen distintas metodologías para estimar el potencial de licuación y, de acuerdo con el enfoque que cada una presente, se podrían obtener diferencias apreciables en la estimación del potencial de licuación de un suelo. A esto se le tiene que añadir también las ventajas y desventajas del ensayo que se vaya a analizar. A fin de estudiar las diferencias entre la aplicación de determinadas metodologías y ensayos específicos, en el presente trabajo se ha desarrollado la estimación del potencial de licuación de una zona ubicada en la zona costera norte del Perú. Esto debido a que existe entre los ingenieros geotécnicos una necesidad de entender y comprender los conceptos y diferencias al momento de analizar el potencial de licuación de un suelo mediante métodos simplificados.

1.1 ANTECEDENTES

En el presente acápite se ha resumido algunas investigaciones relacionadas al desarrollo de metodologías del potencial de licuación que han sido relevantes para el desarrollo del presente documento. También, se menciona investigaciones nacionales que han estudiado el fenómeno de licuación en el Perú.

Una de las primeras metodologías simplificadas para la estimación del potencial de licuación es la desarrollada por Seed et al. (1985) la cual fue implementada para ensayos SPT a partir de observaciones y registros de casos donde se ha observado el fenómeno de licuación. Dicha metodología se basa de la correlación entre la resistencia cortante del suelo al fenómeno de licuación y el esfuerzo cíclico que actúa sobre el terreno. Este procedimiento tuvo una aceptación mundial y ha sido revisado y actualizado a lo largo de los años.

Años después y tomando como base las investigaciones de Seed et al. (1985), Youd e Idriss (2001) presentar un resumen de diversos procedimientos para la evaluación de la resistencia a la licuación de suelos empleando diversos ensayos de campo. Estos procedimientos fueron desarrollados en talleres organizados por el NCEER (National Center for Earthquake Engineering Research) en el año 1996.

En dichos talleres se establecieron criterios para la estimación del potencial de licuación empleando los resultados de ensayos SPT, CPTu y de mediciones de ondas de corte. También se desarrollaron criterios relacionados con el factor de escala en sismos, correcciones por confinamiento y terrenos con pendientes pronunciadas, así como recomendaciones para la elección de valores de magnitudes de sismos y aceleraciones a nivel de superficie.

Posteriormente, Robertson (2009b) presenta una metodología simplificada para la evaluación del potencial de licuación de perfiles de suelo mediante el estudio de su comportamiento geotécnico a partir de los parámetros que brinda el ensayo CPTu. Para el desarrollo de esta metodología se empleó una data histórica actualizada hasta la fecha de la investigación con la finalidad de evaluar la resistencia cíclica en suelos arenosos y finos. A partir de dichas evaluaciones, se desarrolla un procedimiento basado en ensayos CPTu para la evaluación de la resistencia cíclica para suelos con un comportamiento del tipo arenoso y fino.

En los últimos años, Boulanger e Idriss (2014, 2016) presentan una metodología para la estimación del potencial de licuación de suelos basados en técnicas estadísticas. Realizan una revisión de parámetros establecidos en investigaciones previas y además incluyen una expresión ajuste por contenido de finos para el ensayo CPTu. También se hace una revisión de las expresiones para estimar el potencial de licuación empleando ensayos SPT. La metodología desarrollada por Boulanger e Idriss fue contrastada con registros históricos de licuación, encontrándose que predice adecuadamente lo observado en la data histórica.

Con respecto a investigaciones desarrolladas en Perú, Ayala, (2010) desarrolla la evaluación del potencial de licuación de suelos para la ciudad de Tambo de Mora ubicada en Ica. Dicha investigación emplea ensayos SPT realizados en la zona y las metodologías presentadas por Youd e Idriss (2001). De dicho análisis se ha observado que existe un elevado potencial de licuación de suelos, lo que se contrasta con investigaciones previas desarrolladas por el CISMID. A partir de estos resultados, se ha desarrollado un mapa de licuación de suelos de Tambo de Mora en función de la ubicación de los estratos licuables.

Recientemente, Alva y Ortiz-Salaz (2020) presentan una recopilación actualizada de la ocurrencia del fenómeno de licuación en el Perú. En dicho trabajo se indica los lugares donde se ha registrado diversos fenómenos relacionados a la licuación

de suelos tales como volcanes de arena, desplazamientos laterales, fallas de taludes, etc. Se ha concluido que el fenómeno de licuación incide principalmente en las zonas costeras del país las cuales se caracterizan una sismicidad elevada y por estar conformadas predominantemente por depósitos de suelos arenosos y porque existe una sismicidad elevada. Además, el fenómeno de licuación es más crítico en la franja costera debido a que existe una mayor concentración de población.

1.2 PROBLEMÁTICA

Varias ciudades y obras importantes de la zona costera de nuestro país se encuentran construidas sobre suelos potencialmente licuables, lo cual las hace propensas a sufrir daños considerables durante la ocurrencia de un evento sísmico. Esto se ha podido comprobar en los grandes sismos ocurridos en la costa del Perú en las últimas décadas tales como el sismo de Chimbote ocurrido en el año 1970 y el de Pisco ocurrido en el año 2007 (Alva y Ortiz, 2020).

La forma de estimar si un suelo es propenso a licuar generalmente se realiza mediante el empleo de metodologías simplificadas basadas en ensayos de campo y data histórica. Actualmente existen diversas metodologías que han desarrollado sus propias expresiones bajo sus propios criterios. Esto genera que no se sepa a ciencia cierta cuales son las diferencias entre metodologías y su impacto en la estimación del potencial de licuación de un suelo. A esto hay que añadirle los pros y los contras al momento de analizar un ensayo de campo en específico. En el estado de la práctica en el Perú, el ensayo más empleado es el SPT debido a la facilidad de ejecución y al bajo costo de la implementación. A nivel internacional, investigadores han encontrado que los ensayos CPT presentan una mayor precisión y por ende una menor incertidumbre en los resultados a comparación de un ensayo SPT que ha sido realizado sobre el mismo terreno (Jefferies y Davies, 1993).

Debido a la gran variedad de metodologías, existe la posibilidad de obtener resultados completamente diferentes al momento de estudiar un mismo perfil de suelos. Por ejemplo, es posible que el empleo de diferentes procedimientos para la estimación del potencial de licuación arrojen factores de seguridad distintos para un mismo perfil del suelo (Green et al., 2014; Maurer et al., 2015), por lo tanto también se obtendrían potenciales de licuación diferentes. Si se traslada esto a un

proyecto real, se generaría una incertidumbre al momento de proyectar la cimentación de una edificación, afectando notablemente los costos y la serviciabilidad de una obra.

Con base en lo mencionado, el tema propuesto pretende analizar las metodologías simplificadas y los ensayos de campo más aplicados en nuestro medio que son empleados para la estimación del potencial de licuación de suelos. Esto a fin de entender las diferencias entre los resultados de las metodologías aplicadas y las ventajas que presentan ciertos ensayos de campo sobre otros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un estudio comparativo de metodologías simplificadas para la estimación del potencial de licuación empleando ensayos SPT Y CPT_u que han sido ejecutados en una zona de estudio representativa de la costa norte del Perú. Este estudio será desarrollado tomando como base las recomendaciones de la Norma Técnica Peruana E.050 y metodologías desarrolladas a nivel internacional.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar los factores que condicionan al fenómeno de licuación y su ocurrencia en el Perú.
- Estudiar y revisar los ensayos de campo y las metodologías más empleadas en nuestro medio para la estimación del potencial de licuación.
- Estimar el potencial de licuación de una zona de estudio ubicada en la costa norte del Perú.
- A partir de los resultados anteriores, analizar y estudiar las posibles diferencias en los resultados de la estimación del potencial de licuación.
- Recomendar la metodología que presenta una mejor aproximación en la evaluación del potencial de licuación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 EL FENÓMENO DE LICUACIÓN DE SUELOS

A lo largo de los años, diversas investigaciones han planteado varias definiciones para describir al fenómeno de licuación:

- Terzaghi et al. (1996) describe a la licuación como la pérdida súbita de resistencia cortante bajo condiciones no drenadas desde un nivel de fluencia hasta una resistencia crítica sustancialmente menor. Este fenómeno puede ser producido debido a la aplicación dinámica de un único incremento rápido y considerable de esfuerzos o a la aplicación repetida de pequeños incrementos y decrementos de esfuerzos debido al movimiento del terreno, esto último generalmente asociado a movimientos sísmicos o explosiones. Esto ocasiona que el suelo presente de forma temporal la consistencia de un líquido pesado.
- Kramer (1996) menciona que el término de licuación está asociado a varios fenómenos que involucran la deformación del suelo debido a perturbaciones monotónicas, temporales o repetitivas en suelos no cohesivos bajo condiciones no drenadas. Esta situación genera un exceso de presión de poros en la masa de suelo.
- Youd & Idriss (2001) describen como licuación a la transformación de un material granular desde un estado sólido a un estado líquido como consecuencia de un incremento de presión de poros que va de la mano con un decremento de los esfuerzos efectivos. El incremento de la presión de poros es inducido debido a la tendencia que tienen los materiales granulares sueltos a contraerse cuando son sometidos a deformaciones cortantes cíclicas.
- Ayala (2010) define a la licuación como un fenómeno natural que se presenta en suelos granulares con presencia de finos no plásticos y en un estado suelto debido a la aplicación de cargas dinámicas que ocasionan que el suelo pierda paulatinamente su resistencia cortante ocasionando que el suelo se comporte como un líquido viscoso.

De los párrafos anteriores, es posible identificar que el fenómeno de licuación generalmente hace referencia a la pérdida de resistencia de suelos granulares sueltos debido a la acción de cargas monotónicas o cíclicas. Estas cargas generan un incremento en la presión de poros, ocasionando en el proceso que los esfuerzos efectivos disminuyan y por ende también la resistencia cortante del suelo. Cuando la presión de poros supera la resistencia cortante, el suelo tiende a comportarse como un líquido denso y viscoso incapaz de soportar esfuerzo cortante alguno, generando así daños en las estructuras que puedan encontrarse cimentadas sobre el suelo en mención.

2.2 COMPORTAMIENTO GEOTÉCNICO DE SUELOS ARENOSOS SATURADOS

2.2.1 Cargas monotónicas

La respuesta monotónica de un suelo saturado está fuertemente ligada a la densidad relativa, al esfuerzo de confinamiento, a la historia de esfuerzos, al tipo de depositación geológica, etc. Una forma de entender esto es mediante el empleo de la teoría del estado crítico (Critical State en inglés). De acuerdo con Schofield & Wroth (1968) el estado crítico, estado estable o estado último hace referencia a la condición en la que un suelo arenoso sometido a un estado de esfuerzos cortantes constante no presenta variaciones volumétricas ni de esfuerzos. Esta condición se encuentra definida por la línea de estado crítico (CSL por sus siglas en inglés) que representa todas las posibles combinaciones de relaciones de vacíos y esfuerzos de confinamiento en una condición de estado crítico.

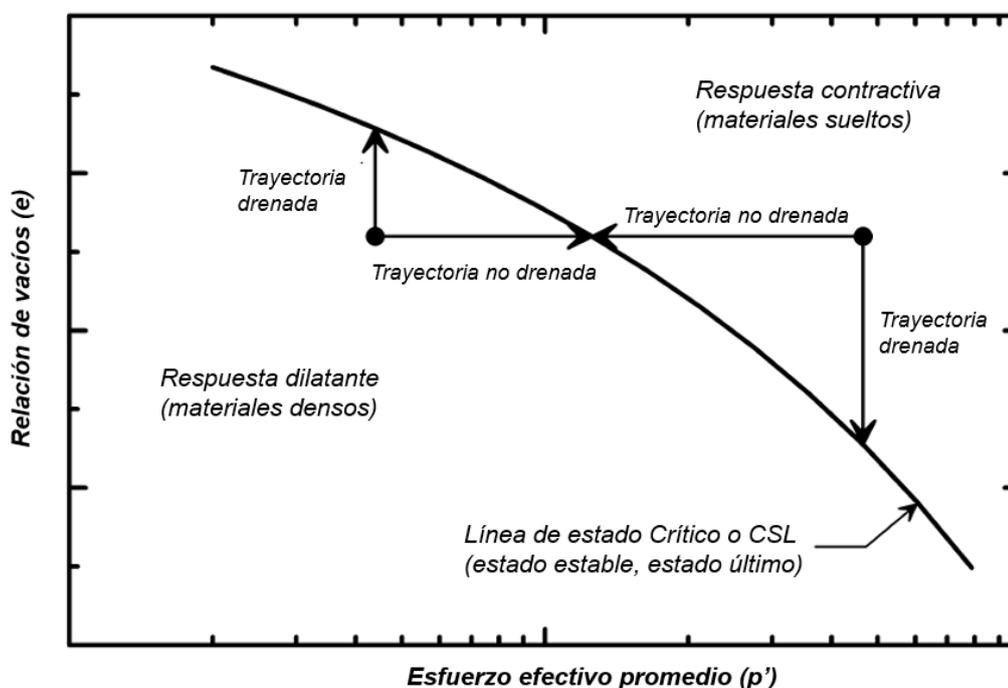


Figura 2.1: Trayectorias para cargas monotónicas en condiciones drenadas y no drenadas, junto con la línea de estado crítico en un plano semilogarítmico e-p'

Fuente: Idriss y Boulanger (2008)

La Figura 2.1 ilustra las trayectorias de las arenas saturadas en condiciones drenadas y no drenadas, tanto para materiales que presentan un comportamiento dilatante (materiales generalmente densos) como contractivo (materiales generalmente sueltos). Cabe observar que la trayectoria drenada se da para una condición de esfuerzo efectivo promedio constante, mientras que la no drenada

se da para una condición donde se mantiene constante la relación de vacíos y por ende también el volumen.

Con respecto a la condición drenada, el suelo tiende a modificar su volumen debido a que existe una disminución de presión de poros como consecuencia de la expulsión del agua. En ensayos de cámara triaxial se puede simular este comportamiento mediante ensayos triaxiales CD (Consolidado – Drenado). Materiales contractivos presentan una disminución de su volumen mientras que materiales dilatantes muestran un incremento de su volumen debido a que existe un reacondo y deslizamiento entre las partículas (dilatancia).

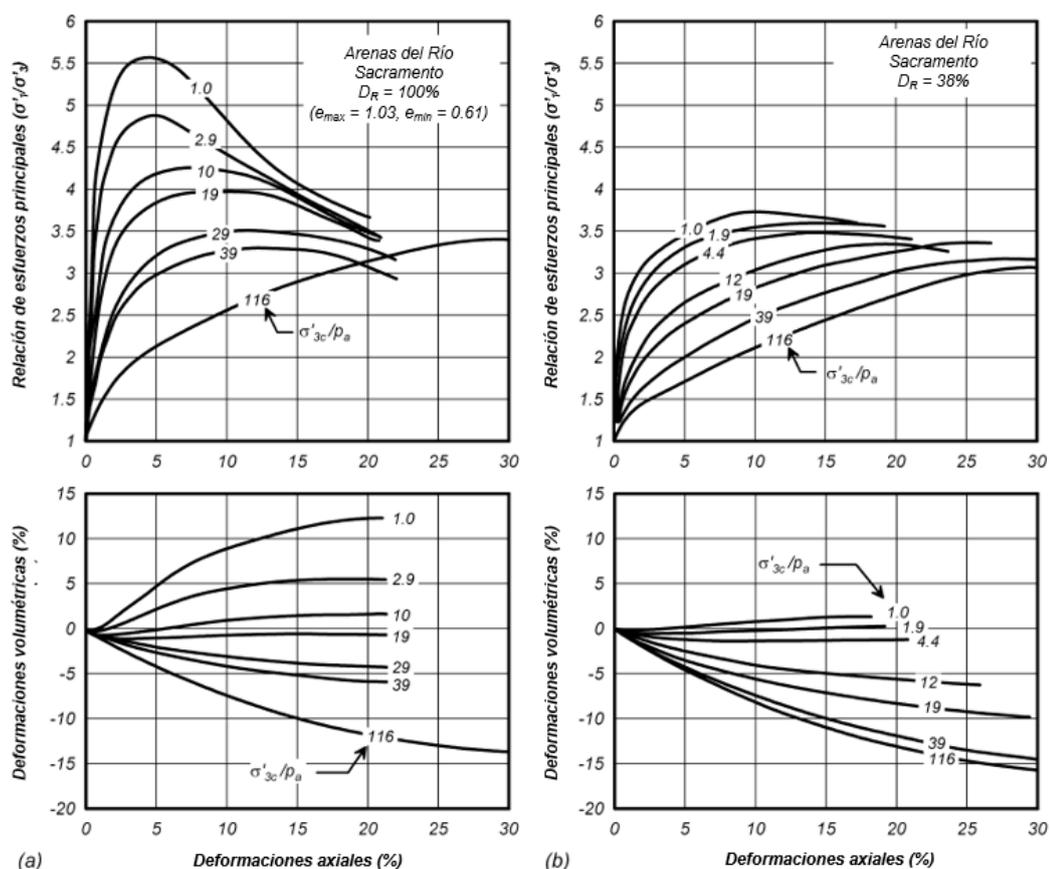


Figura 2.2: Respuesta monótonica en un ensayo triaxial CD de una a) arena densa ($D_R=100\%$) y b) arena suelta ($D_R=38\%$) obtenidas del río Sacramento

Fuente: Idriss y Boulanger (2008)

En la Figura 2.2 se puede apreciar la respuesta monótonica de una arena densa y otra suelta, obtenidas de un mismo sitio. En el espécimen de la parte “a)” se observa que para presiones de confinamiento (σ'_{3c}) menores a 10 atmósferas (p_a), la muestra densa presenta un comportamiento dilatante ya que se observa un incremento de volumen. A partir de σ'_{3c} mayores a 19 atmósferas, el comportamiento de dicha muestra tiende a ser contractivo. Esto se explica considerando que a dicho nivel de esfuerzos la muestra de suelo reorganiza su

estructura interna mediante la rotura de las partículas y no mediante un reacomodo por deslizamientos. Por otro lado, para el espécimen suelto de la parte “b)” se tiene un comportamiento contractivo para todos los casos, con pequeñas variaciones para σ'_{3c} menores a 4.4 atmósferas.

Tanto para la muestra densa como para la suelta, la relación de esfuerzos principales tiende a presentar un valor consistente a grandes deformaciones ($\sigma'_1/\sigma'_3 \approx 3.3$). Por lo que independientemente de la densidad relativa, ambas muestras tienen a presentar un mismo estado crítico, similar a lo observado en la Figura 2.1.

Con respecto al comportamiento no drenado de suelos arenosos, esta condición puede ser representada mediante ensayos triaxiales CU (Consolidado – No Drenado) en los cuales se impide el drenaje del agua en la muestra de suelo durante la etapa de carga. En estas condiciones, se ha observado que las muestras sueltas (contractivas) tienen a presentar un aumento de la presión de poros, mientras que para muestras densas (dilatantes) la presión de poros presentará una disminución por lo que se generará un incremento de los esfuerzos efectivos y de la rigidez del suelo. Además, se ha observado que muestras con una densidad intermedia presentan inicialmente un comportamiento contractivo para posteriormente presentar un “cambio de fase” en la que el material pasa por un estado cuasi estable antes de dilatarse y alcanzar el estado estable o crítico (Vargas et al., 2016). Estos comportamientos se pueden apreciar en la Figura 2.3

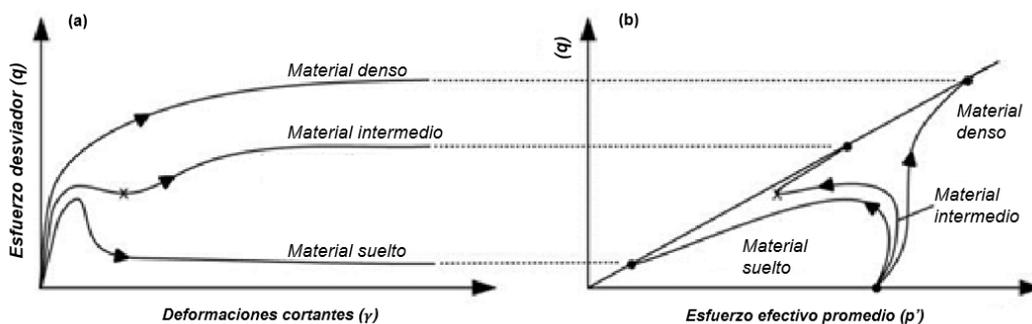


Figura 2.3: Ilustración esquemática del comportamiento no drenado en arenas. (a) Comportamiento esfuerzo deformación, (b) Trayectoria de esfuerzos efectivos
Fuente: National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2021).

2.2.2 Cargas cíclicas

Durante la aplicación de cargas cíclicas (ej. sismos) se produce un incremento de esfuerzos y deformaciones en los suelos poco cohesivos. Debido a la naturaleza cíclica de estos esfuerzos, su dirección y amplitud pueden fluctuar

constantemente. Tanto suelos contractivos como dilatantes presentan un comportamiento contractivo cuando se trabaja a pequeñas deformaciones. Considerando este comportamiento, a medida que se va aplicando la carga cíclica, se va generando un exceso de presión de poros en la masa de suelo, lo que ocasiona que la trayectoria de esfuerzos se acerque a la envolvente de estado crítico, provocando una pérdida de resistencia cortante (Aguirre, 2018).

Complementando lo anterior, se tiene que la trayectoria de esfuerzos bajo cargas monotónicas y la línea de estado crítico forman una “superficie de frontera” para los materiales sometidos a carga cíclica. Durante la aplicación de la carga cíclica, la trayectoria de esfuerzos se desplazará hacia la izquierda debido al incremento de presión de poros que ocasiona la disminución del esfuerzo efectivo promedio (p'). Cuando la trayectoria de esfuerzos llega a la envolvente del estado crítico (resistencia máxima), inmediatamente los esfuerzos efectivos en la masa de suelo disminuyen rápidamente a cero, provocando licuación y grandes deformaciones (ver Figura 2.4). A este fenómeno se le conoce como inversión de esfuerzos cortantes o “Shear stress reversal” por su nombre en inglés.

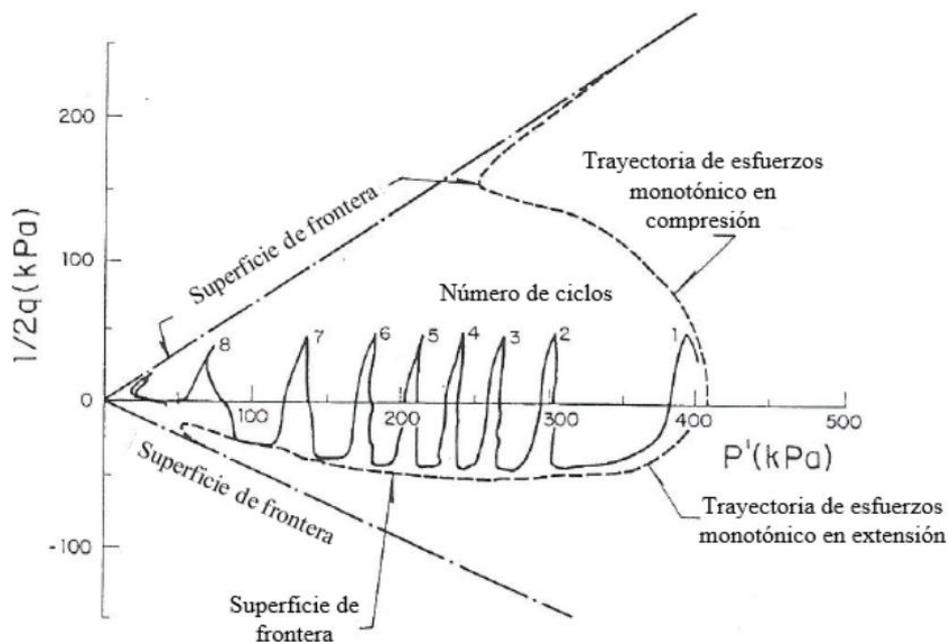


Figura 2.4: Trayectorias de esfuerzos tanto para cargas monotónicas y cíclicas en una arena
Fuente: Aguirre (2018); Ovando-Shelley (1992).

En el supuesto que no se alcance el estado de inversión de esfuerzos cortantes, el suelo presentaría un comportamiento con deformaciones limitadas y con una relación de vacíos inicial debajo de la línea de estado crítico, generando que la respuesta a grandes deformaciones sea netamente dilatante (Vargas et al., 2016).

2.3 CATEGORÍAS DE LICUACIÓN

Con base en el comportamiento de los suelos saturados en el acápite anterior y las investigaciones presentadas por Kramer (1996), Youd & Idriss (1997) y Robertson & Wride (1998), es posible categorizar a los fenómenos asociados a la licuación de acuerdo a los siguientes criterios:

2.3.1 Licuación por flujo

Aplicado generalmente a suelos con un comportamiento contractivo en una condición no drenada (CU). En esta condición se generan fallas cuya ocurrencia es dramática debido al desarrollo rápido de deformaciones. La licuación por flujo suele ocurrir cuando los esfuerzos de corte requerida para mantener el equilibrio estático son mayores a la resistencia del suelo durante la licuación (Kramer, 1996).

La aplicación de esfuerzos cíclicos o estáticos sobre una masa de suelo que presenta un comportamiento contractivo genera un incremento de esfuerzos cortantes, lo que ocasiona que el suelo llegue a una condición de ablandamiento (Strain Softening). En este punto, el suelo sufre una disminución de su resistencia cortante hasta un valor mínimo de resistencia no drenada (S_u), y también grandes deformaciones que suceden a gran velocidad en las estructuras geotécnicas. De forma esquemática, el comportamiento para una condición de carga monótonica se presenta en la Figura 2.5

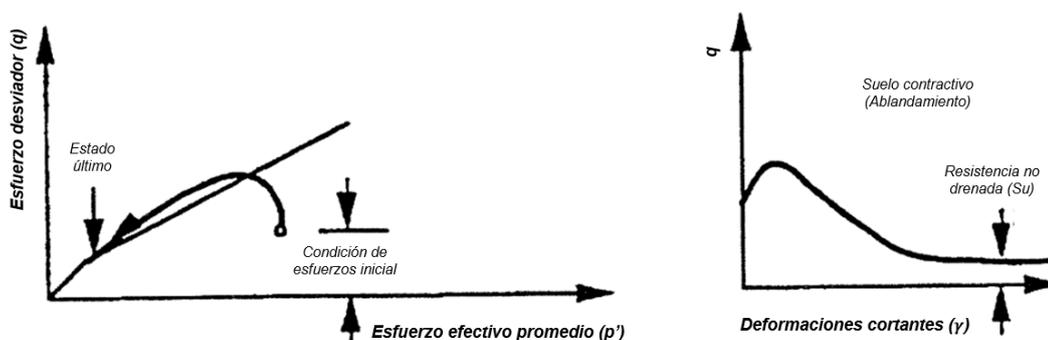


Figura 2.5: Esquema del comportamiento monótonico no drenado de una arena contractiva bajo un ensayo triaxial

Fuente: Robertson y Wride (1998)

Para los suelos contractivos, la licuación por flujo es posible si se puede llegar a una condición de ablandamiento y si las fuerzas gravitacionales son mayores que la resistencia no drenada del suelo. Además, para que una estructura llegue a fallar (por ejemplo, una presa de tierra), la cantidad de volumen de material contractivo debe ser mayor que los materiales dilatativos. También se tiene que considerar la geometría y disposición de los suelos, además de las condiciones

de drenaje y al comportamiento esfuerzo deformación del suelo bajo condiciones no drenadas (comportamiento frágil).

Este tipo de fenómeno es común en suelos “metaestables” en condiciones saturadas tales como depósitos granulares sueltos, arcillas muy sensitivas o depósitos de loess (Robertson y Cabal, 2015). De forma general, las fallas debido a licuación por flujo son raras, sin embargo, su ocurrencia puede generar grandes desastres.

2.3.2 Licuación cíclica

Para este tipo de comportamiento se requiere de la aplicación de una carga cíclica, además tiene que ocurrir el fenómeno de inversión de esfuerzos o que simplemente se desarrollen esfuerzos efectivos nulos durante la aplicación de suficientes ciclos de carga.

A medida que se aplica la carga cíclica y se va perdiendo el esfuerzo efectivo se va generando también deformaciones en la masa de suelo, las cuales irán acumulándose poco a poco, siendo de magnitud considerable cuando el esfuerzo efectivo llega a cero. Estas deformaciones tienden a estabilizarse cuando los ciclos de carga finalizan. La magnitud de las deformaciones depende en gran medida de las condiciones o historia del suelo, la magnitud y duración de la carga cíclica y el grado en el cual ocurra la inversión de esfuerzos de corte.

Cabe mencionar que este fenómeno también podría ser observado en suelos arcillosos, sin embargo, las deformaciones en estos generalmente son pequeñas debido a que en condiciones de esfuerzo efectivo nulo, aún se tendría cierto grado de cohesión (Robertson y Cabal, 2015; Youd y Idriss, 1997).

2.3.3 Movilidad Cíclica

Se da una situación similar al de licuación cíclica, sin embargo, durante la aplicación de la carga cíclica no sucede una inversión de esfuerzos, por lo que no llega a haber una pérdida de esfuerzos efectivos. Debido a esto, las deformaciones generadas por el movimiento no llegan a ser excesivas y tienden a estabilizarse durante y después de la aplicación de los ciclos de carga.

Cabe señalar que este fenómeno puede darse en cualquier tipo de suelo saturado sea dilatativo o contractivo, pero con respecto a este último, una aplicación

constante de esta carga además de una geometría y topografía del suelo adecuada podría generar una pérdida de resistencia súbita, lo que llevaría a tener un caso de licuación por flujo.

Suelos arcillosos también pueden presentar este comportamiento, pero generalmente los efectos viscosos (creep) controlan las deformaciones (Robertson y Cabal, 2015; Youd y Idriss, 1997).

A modo de resumen, en la Tabla 2.1 se presenta una comparativa entre las categorías presentadas

Tabla 2.1: Comparación entre licuación por flujo, licuación cíclica y movilidad cíclica
Fuente: Schneider y Mayne (1999)

Descripción	Licuación por Flujo	Licuación cíclica	Movilidad Cíclica
Condiciones de carga	Estáticas o cíclicas	Cíclicas con inversión de esfuerzos de corte	Cíclicas sin inversión de esfuerzos de corte
Condiciones de drenaje	No drenado	No drenado	No drenado
Respuesta del suelo al corte	contractivo (ablandamiento)	Contractivo o dilatativo (ablandamiento o endurecimiento)	Contractivo o dilatativo (ablandamiento o endurecimiento)
Estado de esfuerzos inducido	Los esfuerzos in situ son mayores a la resistencia no drenada del suelo	Los esfuerzos efectivos llegan a ser nulos	No se llega a desarrollar esfuerzos efectivos nulos
Potencial de falla o deformación	Suficiente volumen de suelo debe presentar un comportamiento contractivo (ablandamiento). La falla resultante puede ser un deslizamiento o flujo de materiales dependiendo de la geometría del suelo y el estado de esfuerzos	La pérdida de resistencia cortante puede generar grandes deformaciones durante la aplicación de la carga cíclica. Los suelos tienen a estabilizarse después de la aplicación de la carga.	Deformaciones limitadas, a menos que se tenga suelo suelto lo cual puede desencadenar una licuación por flujo
Tipo de suelo	Cualquier suelo "metaestable" tales como depósitos granulares muy sueltos, arcillas sensitivas y depósitos de loess.	Casi todas las arenas saturadas, con deformaciones limitadas en suelos arcillosos	Casi todas las arenas saturadas, con deformaciones limitadas en suelos arcillosos

Por último, cabe mencionar que la presente investigación se va a centrar en el estudio del fenómeno de licuación cíclica aplicado a investigaciones en suelos arenosos. Debido a que el tema es bastante amplio, se ha considerado para la presente investigación mencionar los aspectos teóricos más relevantes para una mayor comprensión del fenómeno de licuación.

2.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA LICUACIÓN CÍCLICA DE SUELOS ARENOSOS

2.4.1 Sismicidad

Los efectos ocasionados por la licuación de suelos están fuertemente ligados a la duración y a la intensidad del movimiento sísmico o carga cíclica. Dependiendo de las características asociadas a la sismicidad de un determinado lugar, se podría esperar un determinado valor de aceleración máxima a nivel de roca basal y con base en la estratigrafía de una zona, se podría generar un nivel de aceleraciones mayor a nivel de superficie debido a la propagación de las ondas sísmicas en el suelo. Por otro lado, un sismo debe tener la suficiente duración para poder producir los mecanismos de activación asociados al fenómeno de licuación tales como la inversión de esfuerzos o un estado de esfuerzos efectivos nulos en la masa de suelo.

De lo expuesto, también es posible comentar que la licuación suele registrarse en zonas donde existe un grado de sismicidad considerable, tal y como lo presenta gran parte del territorio peruano.

2.4.2 Condiciones geológicas e historia

Un estudio de la geología de un determinado lugar es parte importante de la caracterización y la extensión de suelos que pueden ser susceptibles a la licuación (Idriss y Boulanger, 2008). De forma general, los suelos más susceptibles a licuar son los depósitos aluviales, fluviales, marinos, deltaicos y eólicos. También, depósitos de origen reciente son susceptibles a licuar y se vuelven más resistentes a medida que su antigüedad aumenta. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de la susceptibilidad a la licuación de suelos de acuerdo al tipo de depósito y a la edad geológica.

Tabla 2.2: Susceptibilidad a la licuación de depósitos de suelos durante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud

Fuente: Idriss y Boulanger (2008), Youd y Perkins (1978).

Tipo de depósito	Distribución de sedimentos no cohesivos en el depósito	Probabilidad de que los sedimentos no cohesivos sean susceptibles a licuar cuando están saturados.			
		< 500 años	Holoceno (11 700 a.C. – Hoy)	Pleistoceno (Hasta 2.58 millones de años)	Pre-Preistoceno (mayor a 2.58 millones de años)
DEPÓSITOS CONTINENTALES					
Cauce de ríos	Localmente variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Planicie o llanura de inundación	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Planicie o abanico aluvial	Extendido	Moderada	Baja	Baja	Muy baja
Llanuras y terrazas marinas	Extendido	---	Baja	Muy Baja	Muy baja

Tipo de depósito	Distribución de sedimentos no cohesivos en el depósito	Probabilidad de que los sedimentos no cohesivos sean susceptibles a licuar cuando están saturados.			
		< 500 años	Holoceno (11 700 a.C. – Hoy)	Pleistoceno (Hasta 2.58 millones de años)	Pre-Preistoceno (mayor a 2.58 millones de años)
Deltas y abanicos deltaicos	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Depósitos lacustrinos y playa	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Depósitos coluviales	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Taludes naturales o laderas	Extendido	Baja	Baja	Muy Baja	Muy baja
Dunas	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Loess	Variable	Alta	Alta	Alta	Desconocida
Till o depósitos glaciares	Variable	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Tobas o tufos volcánicos	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Piroclastos	Extendido	Alta	Alta	---	---
Suelos residuales	Raro	Baja	Baja	Muy Baja	Muy baja
Sebkha	Localmente Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
ZONAS COSTERAS					
Deltas	Extendido	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Estuarios	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Playas – energía de oleaje alta	Extendido	Moderada	Baja	Muy baja	Muy baja
Playas – energía de oleaje baja	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Laguna costera	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Costa (foreshore)	Localmente Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
ARTIFICIAL					
Rellenos no compactados	Variable	Muy alta	---	---	---
Rellenos compactados	Variable	Baja	---	---	---

Evidencias superficiales de licuación han sido comúnmente asociadas a profundidades no mayores a 15 metros, esto debido a que generalmente los depósitos más superficiales típicamente son los más jóvenes y por lo tanto más susceptibles a licuar (Idriss y Boulanger, 2008).

Adicionalmente, se ha encontrado que suelos que han licuado anteriormente son una clara evidencia que implica que el suelo podría licuar nuevamente en el futuro. Por lo tanto, es posible señalar la susceptibilidad a la licuación de un suelo si se tiene un registro histórico donde se haya señalado que dicho suelo ha licuado con anterioridad.

2.4.3 Densidad relativa y relación de vacíos

Con base en lo explicado en acápite anteriores, suelos granulares con una densidad alta serán menos propensos a licuar, todo lo contrario sucede con los suelos granulares sueltos.

De acuerdo con Vargas et al. (2016), suelos con una relación de vacíos baja y una densidad relativa mayor a 65% son menos susceptibles a licuar, por lo que una arena vendría a ser licuable con una densidad relativa menor. Aunque según Ovando-Shelley y Segovia (1996), existen evidencias de arenas que han licuado con densidades relativas superiores al 80%.

Por otro lado en los trabajos de Seed e Idriss (1970) se presentó la susceptibilidad a la licuación de un suelo de acuerdo con su densidad relativa y la aceleración máxima a nivel de superficie considerando un nivel freático a 1.50 metros de profundidad. Esto se resume en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Susceptibilidad a la licuación de un suelo en función de la aceleración máxima a nivel de superficie y a la densidad relativa

Fuente: Seed e Idriss (1970).

Máxima aceleración a nivel de superficie	Probable ocurrencia de licuación	Licuación depende del tipo de suelo y la magnitud del sismo	Licuación poco probable
0.10g	$D_r < 33$	$33 < D_r < 54$	$D_r > 54$
0.15g	$D_r < 48$	$48 < D_r < 73$	$D_r > 73$
0.20g	$D_r < 60$	$60 < D_r < 85$	$D_r > 85$
0.25g	$D_r < 70$	$70 < D_r < 92$	$D_r > 92$

2.4.4 Tipo de suelo

Los materiales granulares saturados sueltos o de baja compacidad son los más propensos a licuar frente a cargas sísmicas. De acuerdo con Vargas et al. (2016), suelos con partículas granulares angulosas y bien graduados son menos propensos a licuar que los suelos con partículas redondeadas y pobremente graduadas.

En la Figura 2.6 se presenta las envolventes de curvas granulométricas correspondientes a suelos que han licuado anteriormente. Estas curvas corresponden a arenas finas, limos arenosos o arenas limosas en un estado suelto.

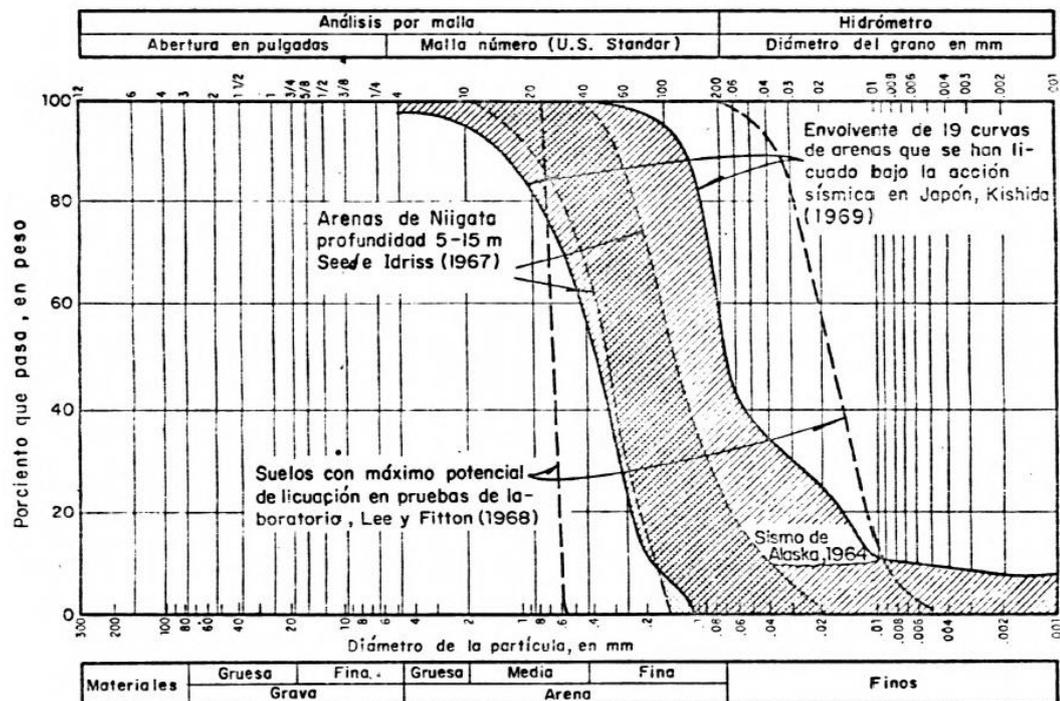


Figura 2.6: Granulometría de algunos suelos que han licuado
Fuente: Jaime (1978)

2.4.5 Contenido de finos

De acuerdo con los trabajos de Bray y Sancio (2006), se ha observado que en los sismos de Northridge (1994), Kocaeli (1999) y Chi-Chi (1999) suelos finos saturados han presentado licuación. Debido a estos hechos diversas investigaciones se han llevado a cabo con la finalidad de estimar la susceptibilidad de licuación de suelos finos, encontrándose lo siguiente:

- No es tan relevante el porcentaje de finos, sino el tipo y cantidad de minerales presentes en la muestra de suelo ya que estos son los que controlan el comportamiento de los suelos finos.
- En consecuencia, el índice de plasticidad (IP) es indicador adecuado para estimar la susceptibilidad a la licuación en materiales finos.

Con base en lo mencionado por Ayala (2010) se puede concluir que para materiales granulares con determinadas cantidades de material fino, la licuación cíclica generalmente suele generarse si los finos presentan un índice de plasticidad bajo y un alto contenido de humedad con respecto a su límite líquido. En algunos casos, se ha encontrado que suelos o arenas limosos pueden presentar licuación debido a sus materiales finos poco plásticos.

2.4.6 Presencia de nivel freático

El fenómeno de licuación se da en materiales que se encuentran saturados, debido a esto, la determinación de la ubicación del nivel freático juega un papel muy relevante, ya que define las condiciones de saturación y las presiones de poros del suelo.

Se ha observado que los fenómenos de licuación suceden en suelos donde el nivel freático se encuentra a pocos metros de la superficie. Además, de acuerdo con Ayala (2010), si existe una fluctuación significativa del nivel freático entonces también habrá un peligro alto de ocurrencia de licuación.

2.5 CONSECUENCIAS DEL FENÓMENO DE LICUACIÓN

2.5.1 Desplazamiento Lateral

Se presenta como el tipo más común de falla de terreno durante la ocurrencia de licuación. Los estratos superiores sufren grandes deformaciones o desplazamientos debido a que el material subyacente en estado licuado se comporta como un fluido. Se suele presentar en zonas con pendientes muy suaves. En la Figura 2.7 se muestra un ejemplo observado durante un sismo.



Figura 2.7: Desplazamiento lateral ocurrido en el terremoto de Kocaeli de 1999

Fuente: Idriss y Boulanger (2008)

2.5.2 Fallas por flujo

Este fenómeno se caracteriza por un desplazamiento repentino de grandes volúmenes de suelo que pueden estar conformados por bloques de suelo y material licuado. Este tipo de daño se caracteriza por desarrollarse en materiales saturados sueltos con pendientes superiores a los 3° (Vargas et al., 2016). En la Figura 2.8 se muestra una fotografía histórica de una falla por flujo.



Figura 2.8: Deslizamiento en el talud aguas arriba en la presa de San Fernando después del sismo de San Fernando 1971

Fuente: Idriss y Boulanger (2008).

2.5.3 Pérdida de resistencia cortante del terreno y asentamientos

Cuando un suelo licúa, pierde su resistencia cortante, lo que ocasiona grandes deformaciones en la masa de suelo. Esta pérdida de resistencia ocasiona que las construcciones desplantadas sobre suelos licuables presenten grandes asentamientos y distorsiones en sus cimentaciones, que terminan generando grandes daños al sistema estructural. En la Figura 2.9 se muestra una fotografía de una falla ocasionada por la pérdida de resistencia de un suelo licuable.



Figura 2.9: Asentamiento producto de la licuación del terreno

Fuente: Ayala (2010)

2.5.4 Volcanes de arena

Durante la licuación de suelos arenosos sueltos se genera una presión de poro bastante elevada. Esta situación obliga a que el agua tienda a fluir hacia la superficie, generando en el proceso pequeñas formaciones de arena con forma de “volcanes”. Cabe señalar que para que estos se formen, tiene que existir una fuerza adicional que permita la expulsión del agua y material hacia la superficie, así como también ser capaz de provocar la fracturación de los estratos superficiales (Vargas et al., 2016). En la Figura 2.10 se presenta evidencias de la ocurrencia de volcanes de arena en una zona de la ciudad de Moyobamba.



Figura 2.10: Volcanes de arena observados en la ciudad de Moyobamba
Fuente: Alva y Ortiz (2020)

2.6 OCURRENCIA DE LICUACIÓN REGISTRADA EN EL PERÚ

En la investigación desarrollada por Alva y Ortiz Salaz (2020) se presenta un mapa actualizado de la de las zonas en las que se ha registrado evidencias de licuación durante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos en el Perú hasta el año 2019 (ver Figura 2.11). Dentro de las conclusiones de dicha investigación se menciona que la licuación ha ocurrido con mayor incidencia en la franja costera, en zonas donde existe una gran concentración de personas y ciudades, además que existe una gran sismicidad debido a la subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Continental.

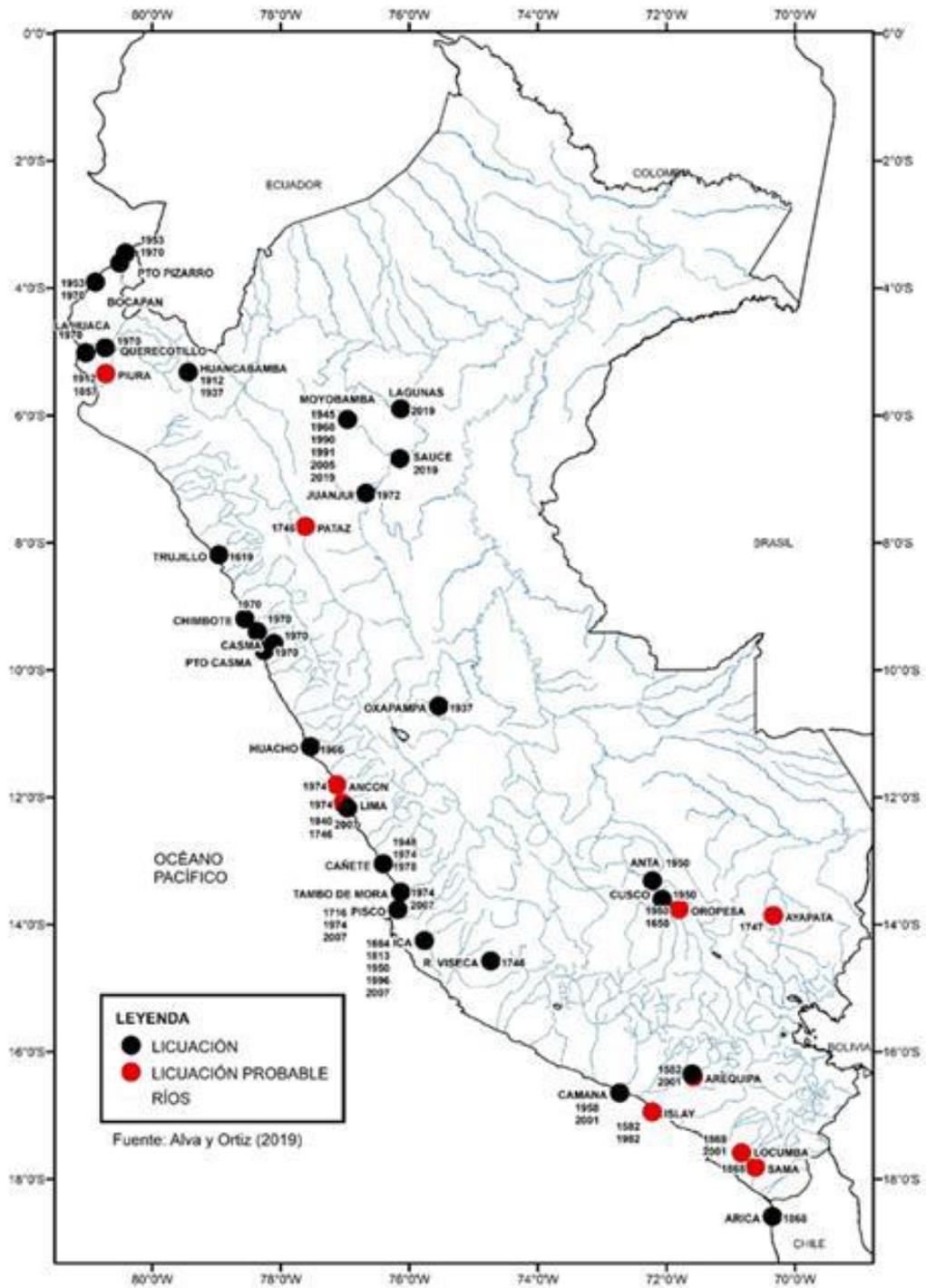


Figura 2.11: Mapa de áreas de licuación en el Perú
 Fuente: Alva y Ortiz (2020)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍAS SIMPLIFICADAS PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN EN BASE A ENSAYOS DE CAMPO

La forma más adecuada e ideal de estimar el potencial de licuación de un material arenoso es mediante el empleo de ensayos de laboratorio. Sin embargo, debido al costo de ejecución de estos ensayos, la implementación de los equipos adecuados y la dificultad que representa el obtener muestras inalteradas de campo, ha hecho que diversos investigadores busquen alternativas relativamente sencillas que permitan determinar si un suelo es licuable.

Durante los últimos años, se han desarrollado distintas metodologías simplificadas que están basadas principalmente en ensayos de campo realizados sobre zonas que han sido identificadas como potencialmente licuables. En este capítulo, se hará un breve resumen de los ensayos más empleados para la estimación del potencial de licuación, además de las metodologías empleadas.

3.1 ENSAYOS DE CAMPO

Para la estimación del potencial de licuación en base a exploraciones de campo se suele emplear ensayos SPT, ensayos CPT, medición de ondas de corte, ensayo de penetración de Becker o BPT, etc. En la práctica, los ensayos más empleados son el Ensayo SPT y el ensayo CPT, los cuales se describen a continuación.

3.1.1 Ensayo de Penetración Estandar (SPT)

El Ensayo de Penetración Estándar o Standard Penetration Test (SPT) es el ensayo más popular a nivel mundial debido a su sencillez de ejecución y debido a que existe una abundante literatura que avala su uso. Este ensayo se ejecuta durante el avance de una perforación en el terreno y se emplea para obtener una medida aproximada de la resistencia del suelo, además con ayuda de un muestreador es posible obtener una muestra disturbada que puede ser empleada para identificar el tipo de suelo. Los procedimientos de este método están normados internacionalmente por la ASTM D1586 (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2018).

El ensayo SPT requiere de la introducción de un muestreador de caña partida en el suelo y la medición del número de golpes para hacer avanzar el muestreador una distancia vertical de 300 mm (1 pie). Para que el equipo penetre en el terreno se requiere un sistema de caída de peso que consiste en un martillo de 63,5 kg (140 lb) que se suelta desde una altura de 76 cm (30 pulgadas) para lograr tres

incrementos sucesivos de 150 mm (6 pulgadas) cada uno. El primer incremento de 15 cm no se registra debido a que se considera que el suelo se encuentra disturbado, mientras que el número de golpes para avanzar el segundo y tercer incremento se suman para dar el valor de N (número de penetración estándar) o resistencia al SPT (reporte de golpes / 0,3 m o golpes por pie). El ensayo se aplica principalmente en suelos arenosos, sin embargo, no se recomienda su empleo en suelos gravosos o arcillas blandas. La Figura 3.1 muestra la secuencia de trabajo para el empleo del muestreador de caña partida durante la ejecución del SPT.

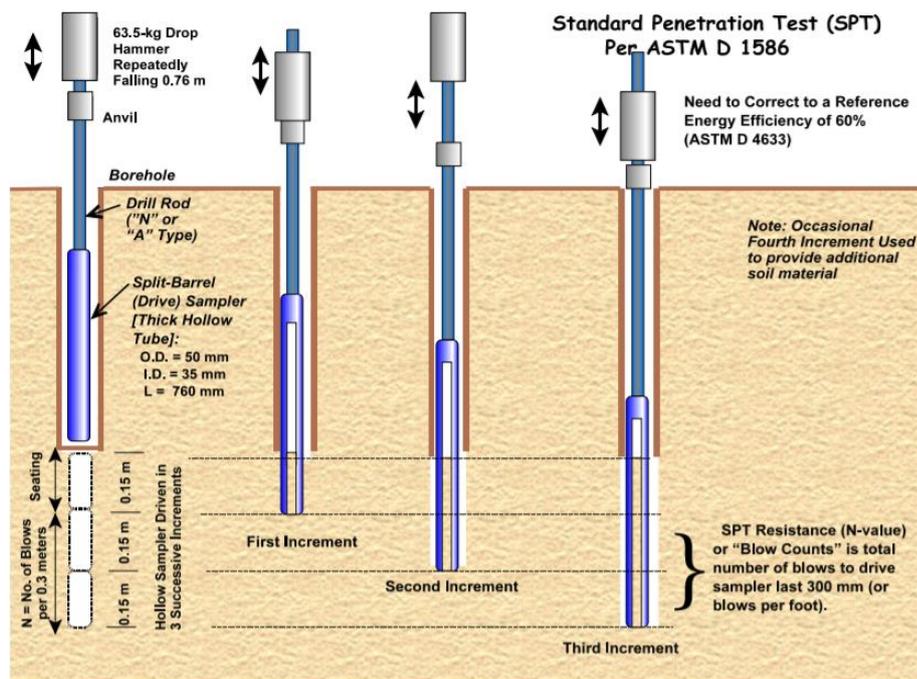


Figura 3.1: Secuencia de penetración del muestreador de caña partida durante la ejecución del ensayo SPT

Fuente: Mayne et al (2001)

El número de penetración estándar, junto con los ensayos de laboratorio que se realicen a las muestras de suelos alteradas, permiten estimar la compacidad o consistencia de un suelo. Además, con base en la literatura técnica disponible, las pruebas SPT también sirven para obtener parámetros de resistencia del terreno en base a correlaciones simples, aunque estas deben de emplearse con cuidado debido a que se han obtenido en base a suelos con características o comportamientos específicos.

Una de las desventajas del número de golpes del SPT radica en la dispersión que pueden presentar los resultados cuando son realizados en un mismo lugar (Jefferies y Davies, 1993). Además, la medición de golpes en campo puede estar sujeta a las condiciones del equipo y la pericia del operador; por lo que en la actualidad se requiere que se mida la energía de caída del martillo.

3.1.2 Ensayo de Penetración de Piezocono (CPTu)

El Ensayo de Penetración de Piezocono o Piezocone Penetration Test – CPTu, también referido como CPT o prueba de cono holandés, es uno de los ensayos de campo más populares ya que es de rápida ejecución y proporciona un perfil continuo de la estratigrafía, además que permite la evaluación del comportamiento del suelo. Este ensayo se encuentra normado por la norma ASTM D5778 (ASTM, 2020).

Para llevarla a cabo no se necesita realizar una perforación previa, simplemente una punta cónica es empujada mediante una serie de varillas de acero en el terreno a una velocidad constante (20 mm/s) hasta una profundidad deseada. Dicho cono se encuentra equipado con sensores que miden la resistencia de la punta del cono a la penetración (q_c), la resistencia a la fricción o lateral del cono (f_c) y la presión de poros en la parte trasera del cono (u_2). A partir de estas tres mediciones es posible comprender el comportamiento del suelo (Eslami et al., 2020), pues:

- Permite distinguir cuando un suelo presenta un comportamiento drenado, parcialmente drenado y no drenado, además de poder estimar sus parámetros de resistencia.
- Es capaz de obtener un perfil continuo del comportamiento del suelo, que permite mejorar la interpretación de los perfiles estratigráficos.
- Es capaz de identificar las variaciones en la presión de poros del terreno.
- Permite estimar la historia de esfuerzos y la relación de sobreconsolidación en el terreno
- Con base en lo anterior, el índice de plasticidad (IP) es indicador adecuado para estimar la susceptibilidad a la licuación en materiales finos.

El ensayo se puede emplear en arcillas muy blandas a arenas densas, pero no es particularmente apropiado para gravas o terrenos rocosos. La Figura 3.2 muestra los procedimientos y componentes del CPT.

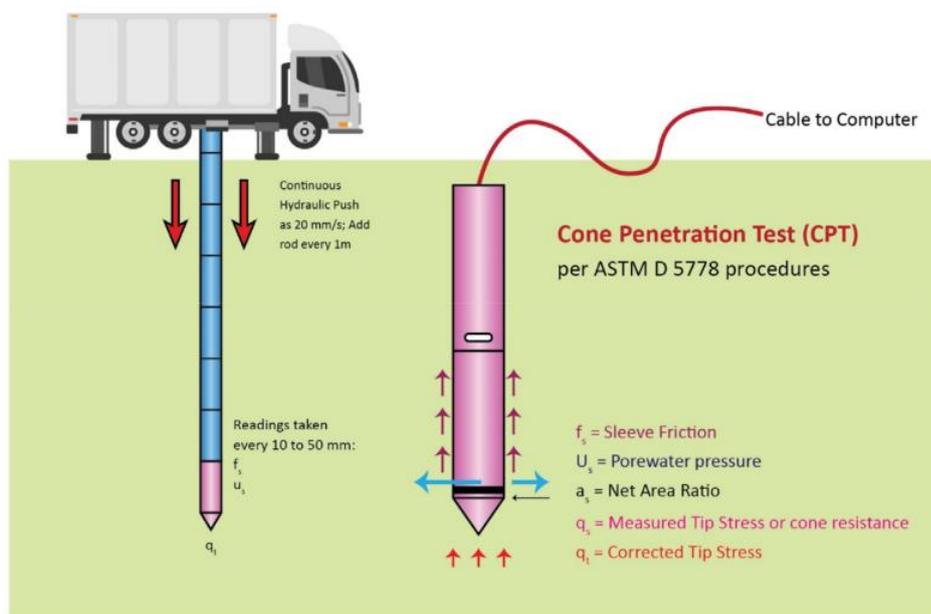


Figura 3.2: Procedimientos y componentes del ensayo CPTu
Fuente: Eslami et al. (2020).

A continuación, en la Tabla 3.1 se presenta una comparación simplificada de los ensayos mencionados a partir de los trabajos de Kulhawy y Mayne (1990) y Mayne et al. (2001).

Tabla 3.1: Comparación de los ensayos presentados.

Comparaciones básicas	SPT	CPTu
Simplicidad del aparato	Equipo simple de implementar. Robusto.	Equipo robusto, complejo y tecnificado
Facilidad del ensayo	Fácil ejecución, se requiere un operario que desarrolle el ensayo.	Fácil ejecución, la maquina realiza el ensayo y el operario supervisa el trabajo.
Perfil continuo o valores de puntos	Valor puntual de todo el perfil de suelo.	Valores continuos de todo el perfil de suelo
Base para la interpretación	Empírico	Empírico, con ciertas bases teóricas
Suelos adecuados	Preferiblemente arenas, uso limitado en arcillas blandas. No se emplea en suelos gruesos.	Se puede emplear sea para arenas o arcillas. No se emplea en suelos gruesos.
Idoneidad en la práctica	Ensayo rutinario. Es el más empleado a nivel mundial debido a su sencillez y fácil implementación. Permite estimar la compacidad o consistencia de un suelo, además que se pueden estimar otras propiedades a partir de correlaciones.	Ensayo rutinario. A nivel internacional es uno de los más populares ya que permite obtener rápidamente perfiles continuos de estratigrafía y el comportamiento del suelo.

3.2 RELACIÓN DE ESFUERZO CÍCLICO (CSR)

El CSR puede ser definido como la relación entre el esfuerzo provocado por un evento sísmico y el esfuerzo efectivo vertical a una profundidad determinada en un perfil de suelo. Seed e Idriss (1971) plantearon la siguiente expresión:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d \quad (3.1)$$

Donde:

- τ_{av} : esfuerzo de corte promedio en el suelo
- σ'_{vo} : esfuerzo efectivo vertical
- σ_{vo} : esfuerzo total vertical
- a_{max} : aceleración máxima horizontal en la superficie del terreno generada por un evento sísmico
- g : aceleración de la gravedad
- r_d : coeficiente de reducción de esfuerzos, debido a la flexibilidad del suelo en función de la profundidad. Algunas formulaciones desarrolladas para su obtención se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Diversas ecuaciones empleadas para la estimación del r_d .

REFERENCIA	DATOS DE ENTRADA	ECUACIONES
Liao y Whitman (1986)	Profundidad.	$r_d = (1 - 0.0765 \cdot z); z \leq 9.15 \text{ m}$ $r_d = (1.174 - 0.0267 \cdot z); 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m}$
Idriss (1999)	Profundidad y magnitud	$r_d = \exp[\alpha(z) + M_w \cdot \beta(z)]$ $\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \cdot \text{seno} \left(\frac{z}{11.73} + 5.133 \right)$ $\beta(z) = 0.106 + 0.118 \cdot \text{seno} \left(\frac{z}{11.28} + 5.142 \right)$
Youd e Idriss (2001)	Profundidad	$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113 \cdot z^{0.5} + 0.04052 \cdot z + 0.00173 \cdot z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177 \cdot z^{0.5} + 0.05729 \cdot z - 0.006205 \cdot z^{1.5} + 0.001210z^2)}$

3.3 RELACIÓN DE ESFUERZOS RESISTENTES (CRR)

Tal y como se ha mencionado en el acápite 3.4, la relación de esfuerzos resistentes o CRR representa la resistencia del terreno a licuarse durante un evento de gran magnitud. Idealmente, el valor de CRR se estima mediante ensayos especiales de laboratorio realizados sobre muestras inalteradas. Sin embargo, debido a la dificultad de obtener muestras de ese tipo en suelos granulares, se suele emplear ensayos de campo tales como el SPT y el CPTu presentados en el acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Existen diversos enfoques para la estimación del CRR mediante ensayos de campo. Para la presente tesis, se ha optado por emplear los siguientes enfoques:

- Las metodologías propuestas en los Talleres de NCEER (Youd y Idriss, 1997, 2001), recomendados por la Norma Peruana E.050 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú, Resolución Ministerial 406-2018-VIVIENDA) para el análisis de licuación en suelos granulares. Se presentan formulaciones para diversos ensayos de campo tales como el SPT, CPTu, Vs, BPT.
- Los trabajos de Robertson y Wride (1998) actualizados por Robertson (2009a). Estos presentan una metodología para la estimación del potencial de licuación mediante el uso del CPTu y es la metodología incluida en los talleres del NCEER.
- Los trabajos de Boulanger e Idriss (2014, 2016), que presentan una metodología actualizada para ensayos SPT y CPTu tomando como base a los trabajos de Youd y Idriss (2001) e Idriss y Boulanger (2008).

Cabe señalar que todas estas metodologías se han desarrollado a partir de una base de datos de perfiles de suelos que han licuado durante eventos sísmicos de gran magnitud. Estas investigaciones han ajustado sus formulaciones según los fenómenos observados en campo hasta antes de la fecha de su publicación. Debido a esto, se les suele llamar a estos métodos como Semi empíricos o simplificados.

A continuación, se presenta un resumen de las formulaciones empleadas para la estimación del CRR mediante ensayos SPT y CPTu.

3.3.1 Estimación mediante ensayos SPT

De acuerdo con lo presentado por Youd e Idriss (2001), A.F Rauch de la Universidad de Texas realiza una aproximación de las curvas de licuación desarrolladas por Seed e Idriss (1971), obteniendo la siguiente expresión para arenas limpias:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N_1)_{60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (3.2)$$

Donde:

- $(N_1)_{60}$: número de golpes del SPT normalizado a una presión de 100 kPa (1 atmósfera), corregido a una eficiencia del martillo del 60%.

- **CRR_{7.5}**: Relación de esfuerzos resistentes para un sismo de magnitud 7.5 Mw.

La ecuación (3.2) es válida únicamente para arenas con $(N_1)_{60}$ menores a 30 golpes. La metodología considera que para suelos con $(N_1)_{60}$ mayores a los señalados son no licuables.

Los trabajos de Seed et al. (1985) han señalado que existe un incremento del CRR a medida que aumenta el contenido de finos de un suelo. Debido a que las curvas de licuación han sido desarrolladas para suelos arenosos limpios, Youd y Idriss (2001) plantean correcciones para valores equivalentes de arena limpia:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot (N_1)_{60} \quad (3.3)$$

$$\text{Si } CF = 0 \rightarrow \alpha = 0$$

$$\text{Si } 5\% < CF < 35\% \rightarrow \alpha = \exp\left(1.76 - \left(\frac{190}{CF}\right)^2\right); \beta = \left(0.99 + \frac{CF^{1.5}}{1000}\right) \quad (3.4)$$

$$\text{Si } CF > 35\% \rightarrow \alpha = 5.0; \beta = 1.2$$

Donde:

- $(N_1)_{60cs}$: número de golpes del SPT normalizado a una presión de 100 kPa (1 atmósfera), corregido a una eficiencia del martillo del 60% y corregido por el porcentaje de finos. Resistencia equivalente a la que se obtendría para una arena limpia.
- α, β : Coeficientes de ajuste.
- CF: contenido de finos, usualmente obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Por otro lado, Boulanger e Idriss (2014), con base en los trabajos de Idriss y Boulanger (2008) plantean la siguiente expresión, la cual fue desarrollada considerando datos de arenas limosas y limos arenosos:

$$CRR_{7.5} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right) \quad (3.5)$$

La influencia del contenido de finos en la estimación del CRR se estima mediante la siguiente expresión:

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (3.6)$$

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{CF + 0.01} - \left(\frac{15.7}{CF + 0.01}\right)^2\right) \quad (3.7)$$

La expresión $\Delta(N_1)_{60}$ representa un incremento del número $(N_1)_{60}$ ocasionado por el contenido de finos.

Para ambas metodologías se emplea el valor del $(N_1)_{60}$, el cual puede ser obtenido mediante la aplicación de diversos factores de corrección al valor del número de golpes del SPT medido en campo:

$$(N_1)_{60cs} = C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \cdot N_{spt} \quad (3.8)$$

Donde:

- C_N : factor de corrección por confinamiento.
- C_E : factor de corrección por la relación de energía del martillo.
- C_B : factor de corrección por el diámetro de la perforación.
- C_R : factor de corrección por la longitud de la barra de perforación.
- C_S : factor de corrección por el método de muestreo.
- N_{spt} : Numero de golpes del ensayo SPT medido en campo.

El C_N es aplicado debido a que el valor de N_{spt} incrementa proporcionalmente al esfuerzo efectivo del suelo, por lo que se requiere una normalización de dicho parámetro. De forma convencional, la corrección se realiza para una presión de 100 kPa o 1 atmósfera.

De forma general, se suele aplicar las expresiones sugeridas por Liao y Whitman (1986):

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad (3.9)$$

Donde:

- P_a : Presión atmosférica (100 kPa o 1 atm.)
- σ'_{vo} : esfuerzo efectivo vertical, en las mismas unidades que la presión atmosférica.

Se recomienda que el valor de C_N no debe de exceder de 1.7. Por otro lado, Kayen et al. (1992) presenta una expresión que se ajusta de una forma más adecuada a las curvas presentadas en los trabajos de Seed y Idriss (1982):

$$C_N = \frac{2.2}{(1.2 + \sigma'_{vo}/P_a)} \quad (3.10)$$

Cualquiera de las ecuaciones (3.9) y (3.10) pueden ser empleadas en la metodología del NCEER, sin embargo tiene que tenerse en cuenta que la primera presenta resultados inciertos para esfuerzos de confinamiento mayores a 200 kPa, mientras que la segunda presenta mejores resultados a esfuerzos de confinamiento mayores a 300 kPa (Vargas et al., 2016).

Por otra parte, Boulanger y Idriss (2014), en base a investigaciones previas, señalan que el valor de C_N puede estar expresado en términos del $(N_1)_{60cs}$:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^m \leq 1.7 \quad (3.11)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} ; (N_1)_{60cs} \leq 46 \quad (3.12)$$

La ecuación (3.11) es iterativa y requiere de una estimación preliminar del valor de m .

El resto de las correcciones necesarias para la obtención del $(N_1)_{60cs}$ pueden ser estimadas a partir de la Tabla 3.3. Estas son válidas tanto para las metodologías del NCEER (Youd e Idriss, 1997, 2001) y la de Boulanger e Idriss (2014).

Tabla 3.3: Correcciones para el equipo SPT

Fuente: Youd e Idriss (2001).

DESCRIPCIÓN	TIPO DE EQUIPO	TÉRMINO	CORRECCIÓN
Relación de energía del martillo	Martillo tipo dona	C_E	0.5 – 1.0
	Martillo de seguridad		0.7 – 1.2
	Martillo Automático		0.8 – 1.3
Diámetro de perforación	65 – 115 mm	C_B	1.00
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15
Longitud de barras	< 3m	C_R	0.75
	3 – 4 m		0.80
	4 - 6 m		0.85
	6 – 10 m		0.95
	10 – 30 m		1.00
Tipo de muestreo	Muestreador estándar	C_S	1.00
	Muestreador con camisa		1.10 – 1.30

Especial atención existe sobre la corrección por la relación de energía del martillo C_E ya que esta depende del tipo de martillo, mecanismo de elevación, pericia del operario y la forma de liberación del martillo. De forma aproximada, la corrección puede determinarse por:

$$C_E = ER/60 \quad (3.13)$$

Siendo ER la eficiencia del martillo empleado. En la Tabla 3.4 se presentan las eficiencias de diversos martillos SPT medidas en distintas ubicaciones alrededor del mundo. Se puede observar que existe una gran variación en la eficiencia promedio transmitida por el martillo. Debido a esto, Youd e Idriss (2001) señalan que debería de realizarse mediciones continuas de la energía transmitida por el martillo en cada sitio donde se realicen ensayos SPT para la estimación del potencial de licuación.

Tabla 3.4: Eficiencias de los martillos SPT alrededor del mundo

Fuente: Clayton (1990), Srithar y Ervin (2001)

UBICACIÓN	TIPO DE MARTILLO	MECANISMO DE CAÍDA	EFICIENCIA PROMEDIO (%)
Argentina	Dona	Serviola/Carrete	45
Brasil	Pin	Caída a mano	72
China	Automático (tipo Pilcon)	Desenganche	60
	Dona	Serviola/Carrete	50
	Dona	Caída a mano	55
Columbia	Dona	Serviola/Carrete	50
Japón	Dona	Accionador Tombi	78
	Dona	Serviola/Carrete	65
Reino Unido	Automático (tipo Dando)	Desenganche	73
	Estándar	Serviola/Carrete	50
E.E.U.U. / Canadá	Seguridad	Serviola/Carrete	55
	Dona	Serviola/Carrete	45

3.4 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

En la práctica ingenieril se suele emplear métodos semi-empíricos basados generalmente en los procedimientos desarrollados por Seed e Idriss (1971). Con base en dichas investigaciones, es posible señalar que la resistencia a la licuación de un suelo está definida por la demanda sísmica que actúa sobre el terreno (CSR) y la resistencia del suelo a licuarse (CRR).

La comparación entre el CSR y el CRR permiten detectar si un estrato de suelo se encuentra propenso a licuar. Si la demanda sísmica es mayor a la resistencia cíclica del suelo, se producirá entonces el fenómeno de licuación. Esto puede representarse por medio de un factor de seguridad:

$$FS_{lic} = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.14)$$

Si el factor de seguridad es menor a la unidad, se producirá la licuación a la profundidad que se esté analizando. Sin embargo, existe cierta incertidumbre con respecto al factor de seguridad debido a que han habido terrenos que han licuado con un FS superior a 1 (Youd e Idriss, 2001). Debido a esto, diversas normativas establecen factores de seguridad en función de la importancia de las estructuras a analizar y el potencial de deformación del terreno. Para el presente trabajo, se va a considerar que cualquier suelo que presente un factor de seguridad menor a la unidad sufrirá licuación durante un evento sísmico.

En los siguientes acápite, se presentan las metodologías y herramientas empleadas para la estimación del CSR y el CRR.

3.4.1 Estimación mediante ensayos CPTu

Robertson (2009b), cuyo trabajo es una actualización de la metodología del NCEER presentada por Robertson y Wride (1998) y (Youd y Idriss, 2001), presenta una estimación del CRR basada en la carta normalizada del comportamiento del suelo (SBT_n). A partir de esta carta (Figura 3.3), se puede definir el índice del comportamiento del suelo (I_c) como:

$$I_c = [(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (1.22 + \log F_r)^2] \quad (3.15)$$

$$Q_{tn} = [(q_t - \sigma_{vo})/P_a] \cdot [P_a/\sigma'_{vo}]^n \quad (3.16)$$

$$F_r = [f_s/(q_t - \sigma'_{vo})]\% \quad (3.17)$$

$$n = 0.381(I_c) + 0.05(\sigma'_{vo}/P_a) - 0.15; n \leq 1.0 \quad (3.18)$$

Donde:

- Q_{tn} : Resistencia de cono normalizada. Es adimensional y toma en consideración la influencia de los esfuerzos verticales in situ de la zona de interés y además varía en función del tipo de suelo y el nivel de esfuerzo.
- F_r : Relación de fricción normalizada, expresada en porcentaje
- q_t : resistencia del cono corregida por presiones de poros.
- f_s : resistencia del cono por fuste medida en campo.
- σ_{vo} : esfuerzo total vertical.
- σ'_{vo} : esfuerzo efectivo vertical.
- P_a : Presión atmosférica.
- n : exponente de esfuerzos que es función del comportamiento del suelo.

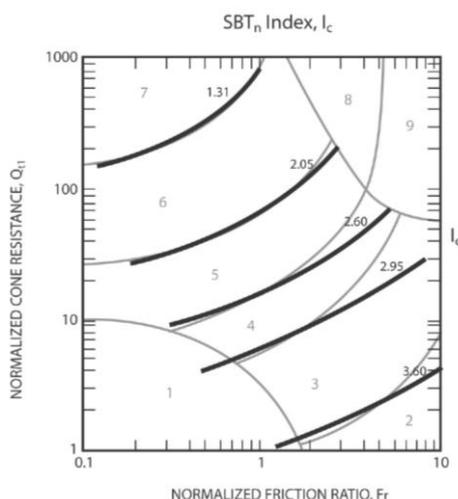


Figura 3.3: Carta normalizada para la determinación del tipo de comportamiento del suelo (SBT).

Las líneas gruesas representan un mismo valor de I_c .

Fuente: Robertson (2009a)

Para la obtención del valor de Q_{tn} y el I_c es necesario realizar un proceso iterativo junto con el valor de n . Este proceso es similar al presentado para la obtención del valor del exponente “m” en el método de (Boulanger y Idriss, 2014)

La SBT_n se presenta en la Figura 3.3, las zonas que se encuentran delimitadas en dicha imagen corresponden a suelos con un mismo tipo de comportamiento (ver Tabla 3.5). A partir de esta, se puede señalar que suelos con valores de I_c superiores a 2.60 presentan un comportamiento similar al de un material fino. Mientras que valores bajos de I_c corresponderían a suelos con un comportamiento de una arena limpia. De acuerdo con lo mencionado, es posible señalar que el I_c esta íntimamente ligado con la mineralogía, plasticidad y contenido de finos de un suelo.

Tabla 3.5: Clasificación del tipo de comportamiento del suelo en función del I_c
Fuentes: Robertson (2009a, 2010, 2016), Robertson y Cabal (2015)

Zona	Tipo de comportamiento del suelo (SBT)	I_c
1	Sensitivo, Grano fino	N/A
2	Suelos orgánicos - Arcilla	> 3.60
3	Arcillas - Arcilla limosa a arcilla	2.95 - 3.60
4	Mezcla de limos - limo arcilloso a arcilla limosa	2.60 - 2.95
5	Mezcla de arenas - arena limosa a limo arenoso	2.05 - 2.60
6	Arenas - arena limpia a arena limosa	1.31 - 2.05
7	Arena grava a arena densa	< 1.31
8	Arena muy rígida a arena arcillosa *	N/A
9	Grano fino muy rígido *	N/A

*Suelos sobreconsolidados o cementados

A partir de la estimación del I_c , Robertson (2009b) presenta las siguientes expresiones para la estimación del CRR:

- Para un $I_c < 2.70$ se tiene:

$$CRR_{7.5} = 93 \left[\frac{Q_{tn,cs}}{1000} \right]^3 + 0.080; \text{ si } 50 \leq Q_{tn,cs} \leq 160 \quad (3.19)$$

$$CRR_{7.5} = 0.833 \left[\frac{Q_{tn,cs}}{1000} \right] + 0.05; \text{ si } Q_{tn,cs} \leq 50 \quad (3.20)$$

$$Q_{tn,cs} = K_c * Q_{tn} \quad (3.21)$$

$$\text{Si } I_c < 1.64 \rightarrow K_c = 1.0 \quad (3.22)$$

$$\text{Si } 1.64 \leq I_c \leq 2.50 \rightarrow K_c = -0.403 \cdot I_c^4 + 5.58 \cdot I_c^3 - 21.63 \cdot I_c^2 + 33.75 \cdot I_c - 17.88 \quad (3.23)$$

$$\text{Si } 1.64 < I_c < 2.36 \text{ y } F_r < 0.5\% \rightarrow K_c = 1.0 \quad (3.24)$$

$$\text{Si } 2.50 < I_c < 2.70 \rightarrow K_c = 6 * 10^{-7} \cdot (I_c)^{16.76} \quad (3.25)$$

- Para un $I_c \geq 2.70$ se tiene:

$$CRR_{7.5} = 0.053 \cdot Q_{tn} \cdot K_{\alpha} \quad (3.26)$$

Donde:

- $Q_{tn,cs}$: Resistencia de cono normalizada y corregida a un valor equivalente de arenas limpias.
- K_c : Factor de corrección por el contenido de finos para determinar la resistencia equivalente en arenas limpias.
- K_{α} : Factor de corrección por esfuerzos cortantes iniciales estáticos (ver acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

Cabe señalar que la metodología de Robertson (2009b) es válida para todo tipo de comportamiento de suelos (cualquier valor de I_c). Además, que su formulación considera distintos niveles de esfuerzos, lo cual hace que no se necesite emplear factores de corrección de esfuerzos (ver acápite **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Por otro lado, Boulanger e Idriss (2014, 2016) señalan que el CRR puede estimarse mediante las siguientes expresión:

$$CRR_{M=7.5; \sigma'_v = 1 \text{ atm}} = \exp \left[\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.80 \right] \quad (3.27)$$

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1N} \quad (3.28)$$

$$\Delta q_{c1N} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left(1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right) \quad (3.29)$$

$$q_{c1N} = C_N \cdot \frac{q_t}{P_a} = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^m \cdot \frac{q_t}{P_a} \quad (3.30)$$

$$m = 1.338 - 0.249 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}; 21 \leq q_{c1Ncs} \leq 254 \quad (3.31)$$

Donde:

- q_t : resistencia por punta del cono corregida por efectos de presiones de poros.
- q_{c1N} : resistencia por punta del cono corregida por efectos de confinamiento y normalizada a 1 atmósfera.
- q_{c1Ncs} : resistencia por punta del cono corregida por efectos de confinamiento, normalizada a 1 atmósfera y corregida por finos. Brinda una resistencia equivalente al de una arena limpia.
- Δq_{c1N} : Ajuste por el contenido de finos aparente.
- C_N : factor de corrección por confinamiento, depende del exponente m.

- **FC**: contenido de finos aparente determinado a partir de las mediciones del CPT.

De acuerdo con Boulanger e Idriss (2014, 2016), el **FC** puede ser estimado mediante la siguiente expresión:

$$FC = 80 \cdot (I_C + C_{FC}) - 137; \quad 0\% \leq FC \leq 100\% \quad (3.32)$$

Donde C_{FC} es un parámetro de ajuste que ha sido estimado en base a correlaciones entre el I_C y el **FC** de muestras obtenidas directamente de perforaciones realizadas en campo. El valor de C_{FC} varía generalmente entre -0.29 y +0.29, siendo el valor por defecto 0.0. Esta correlación presenta una alta dispersión, por lo que es recomendable realizar una calibración si se cuenta con la data de un sitio en específico y correlacionándolo a estratos con un mismo origen geológico.

3.5 FACTORES DE CORRECCIÓN

Las expresiones presentadas en los acápites anteriores han sido determinadas en base a correlaciones empíricas y ciertas asunciones estimadas a partir de información de campo de zonas donde han ocurrido eventos de gran magnitud. Debido a esto, se deben de aplicar factores de corrección debido a parámetros tales como la magnitud del sismo, esfuerzos por confinamiento y estado inicial de esfuerzos cortantes.

A partir de lo mencionado, la expresión del factor de seguridad presentada en la ecuación (3.14) se modifica a una expresión más general presentada en la siguiente ecuación:

$$FS = \left(\frac{CRR_{M=7.5, \sigma'v=1atm}}{CSR_M} \right) \cdot MSF \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (3.33)$$

A continuación, se presentan los factores de corrección recomendados para la estimación del potencial de licuación.

3.5.1 Factor de Escala de Magnitud del Sismo (MSF)

La ecuación (3.1) ha sido estimada ajustando la data de sismos históricos a un evento referencial de 7.5 Mw. Debido a esto, es necesario adicionar un factor de corrección de escala a la ecuación mencionada, o por sus siglas en inglés MSF. A continuación, en la Tabla 3.6 se presenta un resumen de diversas ecuaciones planteadas por varios autores.

Tabla 3.6. Diversas ecuaciones empleadas para la estimación del MSF.

REFERENCIA	DATOS DE ENTRADA	ECUACIONES
Idriss (1999) <i>Para arenas</i>	Magnitud momento	$MSF = 6.9 \cdot \exp\left(-\frac{M_w}{4}\right) - 0.058 \leq 1.80$
Youd e Idriss (2001)	Magnitud momento	$MSF = \frac{10^{2.24}}{(M_w)^{2.56}}$
Boulanger e Idriss, (2007) <i>Para arcillas</i>	Magnitud momento	$MSF = 1.12 \cdot \exp\left(-\frac{M_w}{4}\right) + 0.828 \leq 1.13$
(Boulanger y Idriss, 2014)	Magnitud momento; $(N_1)_{60cs}$ q_{c1Ncs}	$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \cdot \left(8.64 \cdot \exp\left(-\frac{M_w}{4}\right) - 1.325\right)$ $MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{180}\right)^3 \leq 2.20$ $MSF_{max} = 1.09 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{31.5}\right)^2 \leq 2.20$

3.5.2 Factor de Corrección por Confinamiento (K_σ)

A partir de ensayos de carga cíclicas en laboratorio, se ha observado que la resistencia a la licuación aumenta de forma no lineal con el incremento del esfuerzo de confinamiento. Con base en lo mencionado, Seed (1983) emplea el parámetro K_σ para ajustar el CRR a un valor común de esfuerzo efectivo. La definición de dicho parámetro es:

$$K_\sigma = \frac{CRR_{\sigma'_{vc}}}{CRR_{\sigma'_{vc}=1}} \quad (3.34)$$

Donde:

- $CRR_{\sigma'_{vc}}$: Relación de esfuerzo cíclico a un valor específico de esfuerzo vertical efectivo.
- $CRR_{\sigma'_{vc}=1}$: Relación de esfuerzo cíclico a un valor de esfuerzo vertical efectivo igual a 1 atmósfera.

La estimación de valores para el K_σ se realiza generalmente a partir de ensayos de laboratorio, sin embargo, algunos autores han estimado correlaciones a partir de consideraciones teóricas (Boulanger, 2003; Hynes y Olsen, 1999) o empleando regresiones a partir de data histórica (Cetin et al., 2004).

Las metodologías presentadas por Youd e Idriss (2001) recomiendan el empleo de las expresiones desarrolladas por Hynes y Olsen (1999):

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma'_{vo}}{P_a}\right)^{f-1} \quad (3.35)$$

- σ'_{vo} : esfuerzo efectivo vertical.

- P_a : Presión atmosférica, en las mismas unidades que σ'_{v0} .
- f : exponente que depende de las condiciones del sitio tales como la densidad relativa, la historia de esfuerzos, edad geológica y relación de sobreconsolidación.

Como una estimación conservadora o mínima del valor de f , Hynes y Olsen (1999) recomiendan los valores presentados en la Tabla 3.7. En la Figura 3.4 se presenta las curvas recomendadas para la estimación del K_σ .

Tabla 3.7. Valores recomendados para f
Fuente: Hynes y Olsen (1999).

DENSIDAD RELATIVA D_R (%)	f
$40\% \leq D_R \leq 60\%$	0.8 a 0.7
$60\% \leq D_R \leq 80\%$	0.7 a 0.6

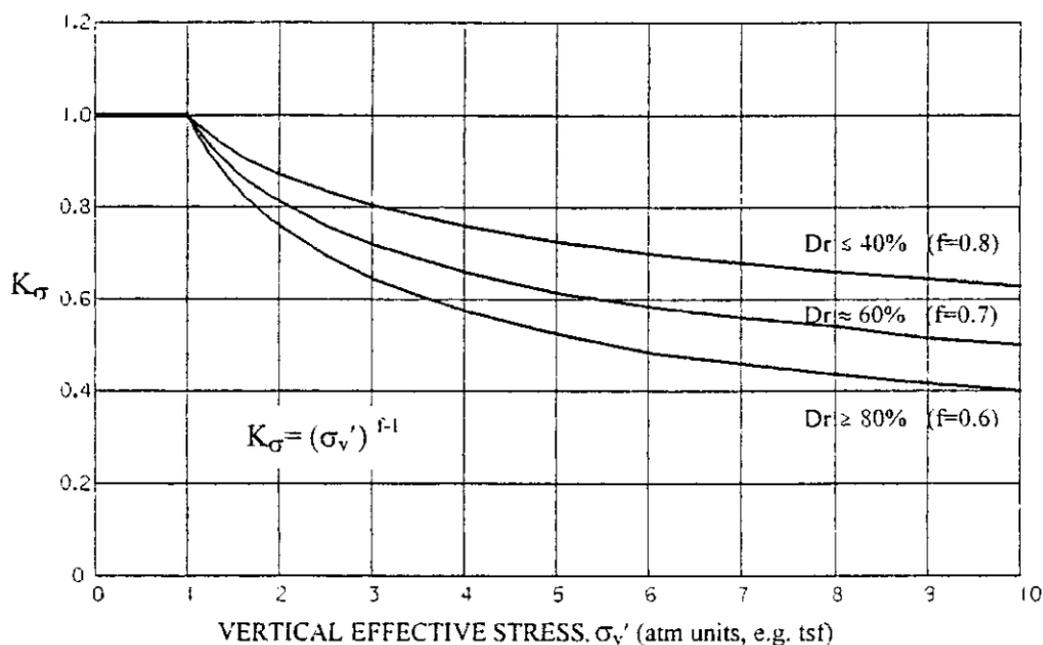


Figura 3.4: Curvas recomendadas para la estimación de K_σ en la práctica ingenieril
Fuente: Youd e Idriss (2001)

La densidad relativa (D_R) puede estimarse mediante las siguientes correlaciones presentadas por Idriss y Boulanger (2008):

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (3.36)$$

$$D_R = 0.478 * (q_{c1N})^{0.264} - 1.063 \quad (3.37)$$

Adicionalmente, Kulhawy y Mayne (1990) sugieren la siguiente relación para la estimación de la densidad relativa:

$$D_R = \frac{Q_{tn}}{305 \cdot Q_C \cdot Q_{OCR} \cdot Q_A} \quad (3.38)$$

Donde:

- Q_C : Factor de compresibilidad que puede variar desde un valor de 0.90 (baja compresibilidad) a 1.10 (alta compresibilidad)
- Q_{OCR} : factor de sobre consolidación que es igual al $OCR^{0.18}$. Este último parámetro puede estimarse a partir de la siguiente expresión sugerida por Kulhawy y Mayne (1990):

$$OCR = 0.33 \cdot Q_{tn} \quad (3.39)$$

- Q_A : factor de envejecimiento o "Aging factor" que es igual a $1.2 + 0.05 \cdot \log(t/100)$.

Por otro lado, Boulanger e Idriss (2014) recomiendan el empleo de las expresiones desarrolladas por Idriss y Boulanger (2008):

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \cdot \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (3.40)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27 \cdot (q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3; q_{c1Ncs} \leq 211 \quad (3.41)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55 \cdot \sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3; (N_1)_{60cs} \leq 37 \quad (3.42)$$

Cabe señalar que de acuerdo con (Robertson, 2009b), no sería necesario aplicar una corrección por confinamiento para su metodología debido a que el valor del exponente de esfuerzos "n" presentado en la ecuación (3.14) empleado para estimar el valor del I_c captura la correcta respuesta del suelo a altos niveles de esfuerzo. Debido a esta situación, este valor no será empleado para la estimación del LPI con la metodología mencionada.

3.5.3 Factor de Corrección por Esfuerzos Cortantes Estáticos (K_α)

La resistencia de suelos dilatantes se incrementa a medida que aumenta el esfuerzo cortante aplicado sobre ellos. La situación contraria sucede en suelos contrativos. A fin de incluir los efectos de la resistencia cortante en la estimación del potencial de licuación, Seed (1983) emplea el factor de corrección K_α . Los valores para este factor han sido generados a partir de una normalización del esfuerzo cortante estático τ_{st} con respecto al esfuerzo vertical efectivo σ'_{vo} mediante el empleo de un parámetro de fluencia α :

$$\alpha = \tau_{st}/\sigma'_{vo} \quad (3.43)$$

El valor de α puede ser estimado empíricamente mediante ensayos triaxiales de compresión cíclica. En la Figura 3.5 se muestra los valores recomendados de K_α obtenidos de los trabajos de Harder y Boulanger (1997).

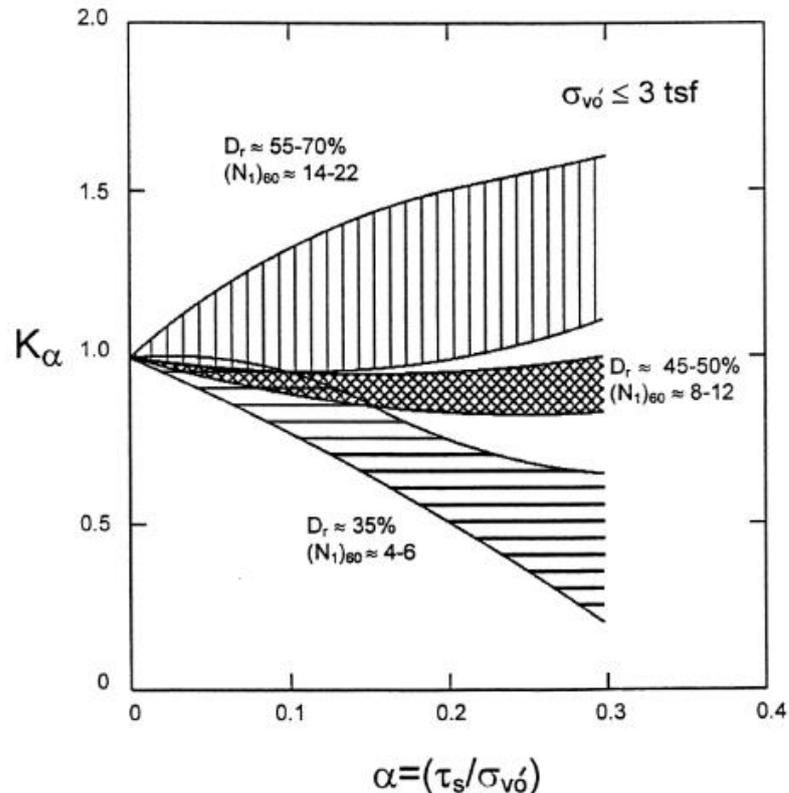


Figura 3.5: Valores recomendados para K_α para esfuerzos efectivos de confinamiento menores a 3 tsf o 2.8 atmosferas

Fuente: Harder y Boulanger (1997).

El empleo del factor K_α es generalmente omitido en los análisis de superficies niveladas o con pendientes muy bajas, sin embargo, este es de importancia para el análisis de licuación en pendientes inclinadas o presas de tierra. Para el presente trabajo, el empleo de este factor será omitido debido a que los análisis se realizarán a un terreno con una topografía plana.

3.5.4 Consideraciones adoptadas para el presente trabajo

Con la finalidad de desarrollar una visualización de resultados un poco más óptima, para el presente trabajo se ha considerado lo siguiente:

$$FS = \left(\frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm}}{CSR^*} \right) \quad (3.44)$$

$$CSR^* = \frac{CSR_M}{MSF \cdot K_\sigma}$$

Durante el análisis de resultados, se empleará la expresión CSR* para representar la demanda sísmica sobre el terreno considerando los efectos de la magnitud del sismo y el confinamiento del terreno a profundidad.

3.6 ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE POTENCIAL DE LICUACIÓN

El factor de seguridad frente a la licuación permite tener una percepción del comportamiento de un estrato específico de suelo, sin embargo, este no permite comprender el comportamiento global de todo un perfil estratigráfico ni tampoco estimar los posibles daños que puedan ocasionarse a las estructuras apoyadas sobre estos. Debido a esto, Iwasaki et al. (1978) propone el empleo del índice de potencial de licuación (I_L o LPI por sus siglas en inglés), el cual permite estimar la severidad del fenómeno de licuación para un determinado sitio.

El LPI puede ser estimado mediante las siguientes ecuaciones:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) * W(z) * dz \quad (3.45)$$

$$F(z) = 1 - FS(z); FS(z) \leq 1 \quad (3.46)$$

$$F(z) = 0; FS(z) \geq 1 \quad (3.47)$$

$$W(z) = 10 - 0.5 \cdot z \quad (3.48)$$

Donde:

- $F(z)$: función que toma en cuenta la severidad de la licuación en un estrato de suelo.
- $W(z)$: función que toma en cuenta el grado de licuación a medida que incrementa la profundidad. suelos más superficiales serán más propensos a licuar que los más profundos.
- z : Profundidad del estrato.
- $FS(z)$: factor de seguridad frente a la licuación a una determinada profundidad.

En la Figura 3.6 se muestra un esquema del proceso de integración para la obtención del LPI.

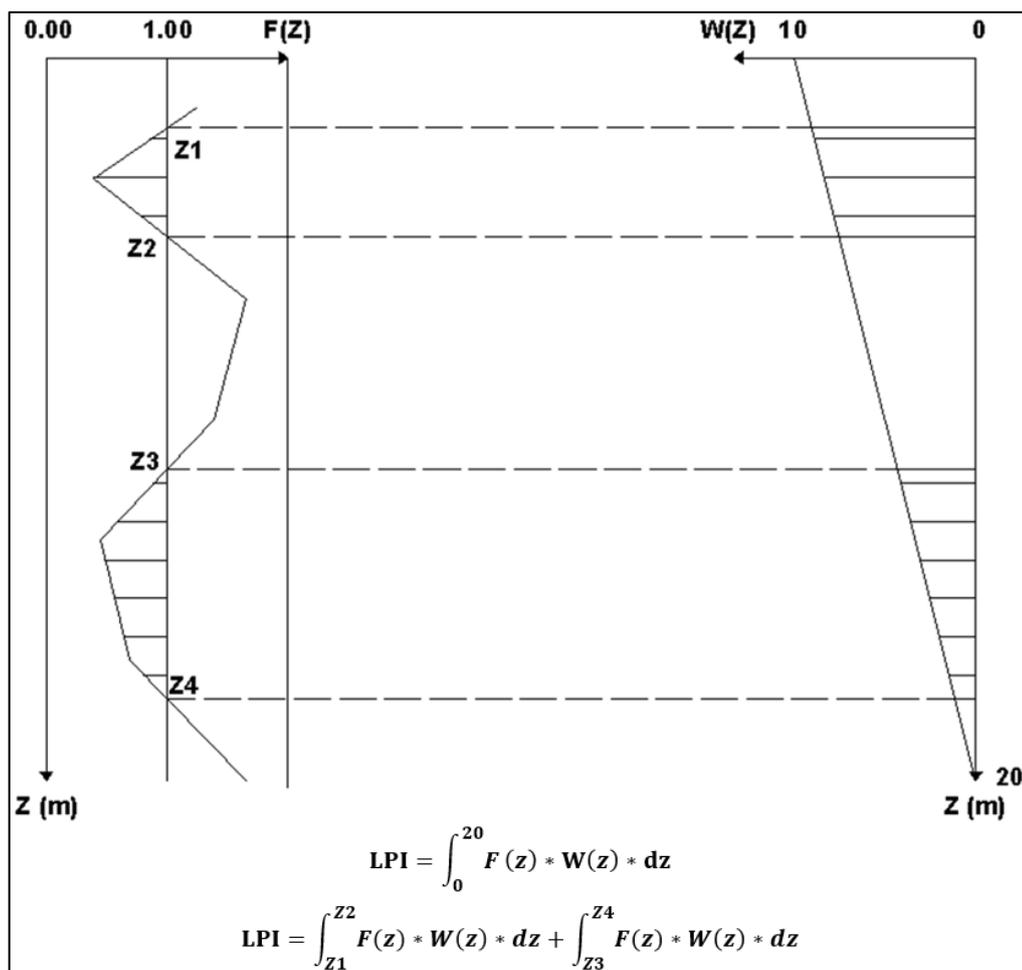


Figura 3.6: Proceso de integración para la estimación del LPI.

Fuente: Ayala (2010).

De acuerdo con los resultados del LPI, y comparándolo con data histórica registrada en Japón, Iwasaki et al. (1981) definió rangos para clasificar los posibles riesgos a la licuación. En la Tabla 3.8 se detalla la clasificación.

Tabla 3.8: Riesgo de licuación en el terreno según el potencial de licuación

Fuente: Iwasaki et al. (1981, 1984)

LPI	DATOS DE ENTRADA	DESCRIPCIÓN
LPI = 0	Riesgo de licuación muy bajo	El potencial de licuación es muy bajo. No es necesario realizar más investigaciones detalladas para estimar el potencial de licuación.
0 < LPI ≤ 5	Riesgo de licuación bajo	El potencial de licuación es bajo, sin embargo, es recomendable realizar investigaciones solo en estructuras especiales.
5 < LPI ≤ 15	Riesgo de licuación alto	El potencial de licuación es bastante alto. Se requieren investigaciones detalladas con la finalidad verificar el potencial de licuación. Además, se requiere medidas para mitigar el potencial de licuación.
15 < LPI ≤ 100	Riesgo de licuación muy alto	El potencial de licuación es muy elevado y se necesita investigaciones detalladas y medidas de mitigación para la licuación de suelos.

Por otro lado, la norma peruana E.050 “Suelos y Cimentaciones” (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú, Resolución Ministerial 406-2018-VIVIENDA), emplea los siguientes criterios para la clasificación del potencial de licuación:

Tabla 3.9: Clasificación del potencial de licuación

Fuente: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú, Resolución Ministerial 406-2018-VIVIENDA

LICUACIÓN	LPI
Alta	$LPI > 50\%$
Moderada	$10\% < LPI \leq 50\%$
Baja	$5\% < LPI \leq 10\%$
Muy Baja	$LPI \leq 5\%$

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN APLICADO EN LA COSTA NORTE DEL PERÚ

A lo largo de la zona costera peruana se observa que grandes ciudades se han construido sobre suelos predominantemente arenosos con un nivel freático muy cercano a la superficie. A esto hay que añadirle que el Perú se encuentra en una zona altamente sísmica, siendo la costa la que presenta una mayor frecuencia de sismos. A grandes rasgos, todo esto hace que los suelos de las zonas costeras sean muy susceptibles a presentar licuación durante eventos de gran magnitud.

Lo mencionado puede evidenciarse revisando los registros de sismos históricos. Ciudades como Pisco, Cañete, Huacho, Casma, Chimbote, Trujillo, Piura, etc.; han presentado fenómenos asociados a la licuación de suelos (Alva y Ortiz, 2020). No vendría a ser extraño que durante la ocurrencia de algún evento sísmico en los próximos años ocurran fenómenos de licuación en las ciudades mencionadas o en otras donde el subsuelo presenta condiciones similares a estas.

En años anteriores, varios investigadores e instituciones han realizado evaluaciones del potencial de licuación de varias ciudades de la costa empleando principalmente metodologías simplificadas similares a las presentadas en el acápite 3 del presente documento. Esto con la finalidad de identificar áreas potencialmente licuables debido a que estas generarán grandes daños durante terremotos, sobre todo si se encuentran dentro de áreas urbanas ya que pueden afectar la integridad de las estructuras y servicios esenciales.

Para el presente trabajo de investigación, se ha realizado el análisis de licuación de una zona ubicada en la costa norte del Perú. Las características sísmicas, geológicas y geotécnicas de dicha zona junto con las consideraciones y los escenarios de análisis se presentan en los siguientes acápites.

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 Geología local de la zona de estudio

La zona de estudio está ubicada geomorfológicamente sobre la plataforma costera nor occidental del Perú. Limita al oeste con el litoral peruano, mientras que al este se pueden encontrar estribaciones andinas. Gran parte de la zona de estudio se encuentra cubierta por materiales sedimentarios cuaternarios de origen marino y continental. Dichos depósitos están conformados por arenas de una compacidad suelta a media, con presencia de materiales finos y en algunos casos fragmentos

de conchuelas. Sobre dichos depósitos suele encontrarse material de origen antrópico (Rellenos heterogéneos).

Localmente, el área de interés presenta una topografía plana, con ligeras elevaciones. Para fines prácticos, se ha considerado al terreno como plano.

4.1.2 Sismicidad

Con base en la recopilación de los principales eventos sísmicos sucedidos en el Perú entre 1513 y 1974 realizada por Silgado (1978), a continuación se presenta un resumen de los sismos de gran magnitud que han sucedido en la costa norte del país o en lugares cercanos a esta zona:

- **El sismo del 23 de marzo de 1606** a las 15:00 horas, estremeció violentamente la tierra en Saña y Lambayeque, este sismo fue sentido en grandes extensiones de las zonas aledañas.
- **Sismo del 14 de febrero de 1619** a las 11:30 horas: Terremoto que destruyó a la ciudad de Trujillo; fue sentido a 200 km al norte y a más de 600 km al sur. La destrucción se extendió a las poblaciones de Zaña y Santa. Murieron 350 personas. Licuación y agrietamiento de suelos. En la ciudad de Lima se sintió como fuerte temblor que causó la salida de la gente de sus casas. Se estimó las siguientes intensidades: Trujillo IX (Escala de Mercalli modificada o MMI), Chicama y Santa VIII (MMI), Ancash, Barranca y Zaña VII (MMI), y Lima V (MMI).
- **Sismo del 28 de octubre de 1746** a las 22:30 horas: Destrucción de casi la totalidad de casas y edificios en Lima y Callao. Murieron más de 1100 personas en Lima. Destrucción de 44,000 km². Sentido en Guayaquil, en la confluencia del río Marañón con el Huallaga, en Huancavelica (muy fuerte). En Lucanas (Ayacucho) hubo agrietamientos del terreno y deslizamientos. Se sintió en Cuzco y Tacna. Un tsunami de grandes proporciones inundó el Callao hasta 6 km, matando casi toda la población y destruyendo Guañape y Punta Caballas. Intensidad de X (MMI) en Chancay y Huaral, IX –X (MMI) en Lima, Barranca y Pativilca, VIII (MMI) en Huarmey, Huaylas y la Cordillera Negra, VII (MMI) en Lucanas, Huancavelica y Pisco.
- **El sismo del 02 de setiembre de 1759**, que causó cinco víctimas en Trujillo y averió sus construcciones. La catedral sufrió daños en sus bóvedas, arquerías y torres. Sentido a lo largo de la Costa entre los pueblos de San Pedro, Lambayeque hasta Villa de Santa. En los pueblos de la sierra de Huamachuco fue intenso.
- **El sismo del 20 de agosto de 1857**, a las 07:00 horas, ocurrió un fuerte sismo en Piura, que destruyó muchos edificios. Así mismo, se observó procesos de licuación de suelos. Se reportaron daños menores en el Puerto de Paita

- **Sismo del 24 de mayo de 1940** a las 11:35 horas: Terremoto de grado VIII (MMI) en Lima, fue sentido desde Guayaquil en el norte hasta Arica en el sur, hubo tsunami, causó 179 muertos y 3500 heridos. Intensidad de VI (MMI) en el Callejón de Huaylas, V (MMI) en Trujillo, IV (MMI) en Paita y Piura.
- **El sismo del 12 de diciembre de 1953**, a las 12:31 horas ocurrió un evento fuerte y prolongado que afectó seriamente la parte NW del Perú y parte del territorio ecuatoriano. En las poblaciones peruanas de Tumbes y Corrales, causó la muerte de 6 personas, 20 heridos y numerosos daños materiales. La intensidad del movimiento se estimó entre VII y VIII en la escala modificada de Mercalli. Se apreciaron efectos de licuación de suelos.
- **Sismo del 20 de noviembre 1960** ocurrido frente a las costas de Lambayeque y Piura, generó un tsunami es mucho más grande de lo que se esperaría para un terremoto de magnitud moderada. Hubo dos muertos en Piura y 3 por un tsunami de 9 metros de altura, en los puertos de Eten y Pimentel.
- **Sismo del 17 de octubre de 1966** a las 16:41 horas: Fue uno de los más destructores ocurridos en Lima después del sismo de 1940. Cien personas muertas. Fue destructor a lo largo de la franja litoral entre Lima y Supe. La intensidad máxima se estimó en VIII. La aceleración producida en Lima fue de 0.4 g. Intensidades: VIII en Huacho, Huaura, Chancay, Puente Piedra y Supe, VII en Lima y Cajatambo, VI en Huaraz, Chimbote, Virú y V en Trujillo.
- **Sismo del 31 de mayo de 1970** a las 15:23 horas. Fue uno de los sismos más catastróficos ocurridos en el Perú, murieron 50,000 personas, desaparecieron 20,000 y quedaron heridos 150,000, según informe CRYRSA. Dentro de las características del sismo, se puede mencionar que, en la zona de la costa cercana al epicentro, se produjeron los fenómenos de licuación, deslizamiento de los taludes de la cordillera y el gran aluvión que arrasó con la ciudad de Yungay al desprenderse la cornisa norte del nevado Huascarán, arrastrando piedras, nieve y lodo. El sismo fue sentido desde Tumbes hasta Ica y desde la costa hasta Iquitos, produciéndose intensidades de IX (MMI) en Casma y Chimbote, VIII (MMI) en el Callejón de Huaylas y VII (MMI) en Trujillo, Moche y Paramonga.
- **Sismo del 9 de diciembre de 1970**, a 23:35 horas terremoto de magnitud 7.2 entre Piura y Tumbes. Epicentro al sur de Tumbes, 48 muertos. Se sintió en Ecuador donde hubo muertes y daños materiales. La máxima intensidad fue de VIII (MMI). Cerca del caserío de Huaca, se agrietó el suelo brotando arena y lodo.

Por otro lado, de acuerdo con el mapa de zonificación sísmica presentado en la Norma Técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" (MVCS, 2019), el área de estudio se encuentra ubicada en la Zona 04, en la franja costera (ver Figura 4.1). A partir de esto, la norma le asigna un factor de zona (Z) igual a 0.45. Este factor se

expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad, y es aquella aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10.0 % de ser excedida en 50 años, o lo que es equivalente a un periodo de retorno de 475 años. Cabe señalar que la magnitud considerada para este mapa de aceleraciones es de 8.0 Mw (Roncal, 2017).



Figura 4.1: Zonas sísmicas según la Norma E.030
Fuente: MVCS (2019).

A partir de lo mencionado, para el presente trabajo se ha considerado dos (02) escenarios de análisis:

- El primer escenario contempla un sismo de magnitud 7.0 Mw y una aceleración máxima en superficie de 0.30 g (escenario esperable o intermedio).
- El segundo escenario contempla un sismo de magnitud 8.0 Mw y una aceleración máxima en superficie de 0.45 g (escenario crítico).

Ambos escenarios han sido escogidos en función a lo observado en la sismicidad histórica, las recomendaciones de la normativa vigente y el estado de la práctica en la ingeniería civil peruana.

4.2 EXPLORACIONES GEOTÉCNICAS

4.2.1 Ensayos de Penetración Estandar (SPT)

Para el presente trabajo, se ha recopilado la información de veintidos (22) perforaciones en las cuales se ha ejecutado ensayos SPT con un espaciamiento variable. Estos ensayos han sido ejecutados empleando muestreadores de caña partida, con diámetros de perforación no mayores a 10 centímetros y con un martillo tipo dona de 140 libras o 63.5 kilogramos. Las perforaciones se han ejecutado hasta una profundidad máxima de 30 metros desde la superficie. La distribución de estas exploraciones se encuentra adjunta al final del presente documento (ver Plano P-01). En la Figura 4.2 se presenta una recopilación de los resultados de los ensayos empleados para el presente trabajo. Un detalle de cada uno de estos se puede revisar en el Anexo A.

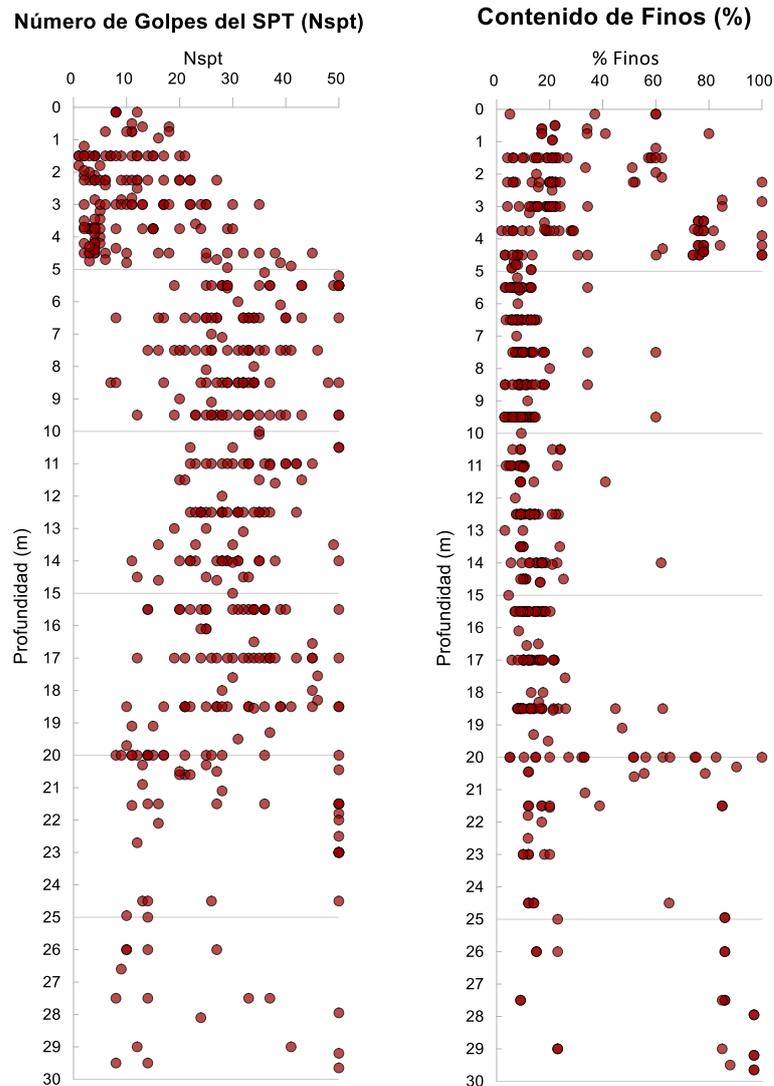


Figura 4.2: Recopilación de resultados de los ensayos SPT.

Cabe observar que los resultados obtenidos de estos ensayos presentan una dispersión notable, lo cual es común en este tipo de ensayos sobre todo cuando no se cuenta con mediciones de energía del martillo.

4.2.2 Ensayos de Penetración de Cono CPTu

Para el presente trabajo, se ha recopilado la información de veintiocho (28) ensayos CPTu los cuales han alcanzado profundidades comprendidas entre 20 y 30 metros con respecto de la superficie, siendo la profundidad típica igual a 25 metros. La distribución de estos sondajes se encuentra adjunta al final del presente documento (ver Plano P-01). En la Figura 4.3 se presenta una recopilación de los resultados de los ensayos empleados para el presente trabajo. Un detalle de cada uno de estos se puede revisar en el Anexo B.

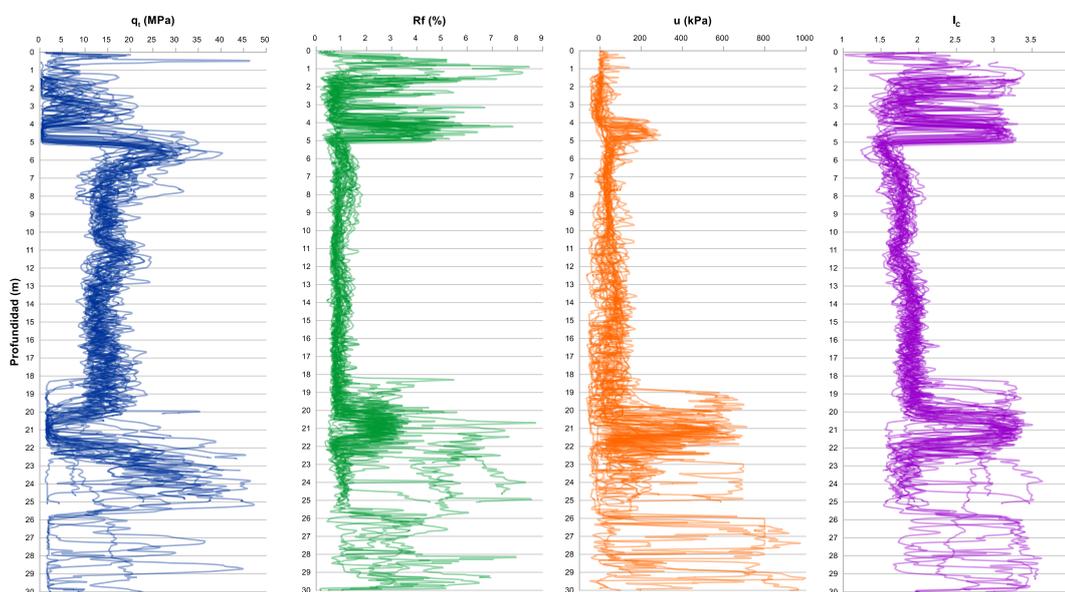


Figura 4.3: Recopilación de resultados de los ensayos CPTu.

De la figura anterior es notable observar que a diferencia de los ensayos SPT, los CPTu presentan una dispersión relativamente baja, además que se aprecian ciertas tendencias entre los valores a profundidad y en toda la extensión del área de estudio.

4.2.3 Descripción de la estratigrafía de la zona de estudio

A partir de los sondajes recopilados, se ha podido definir la siguiente estratigrafía representativa:

- Superficialmente se observa la presencia de un material de relleno que puede tener hasta 2.00 metros de espesor. Dicho material consiste

generalmente en una mezcla de grava, arena, limo y arcilla además de escombros mezclados con los suelos mencionados

- Debajo del estrato anterior se puede observar materiales arenosos y limosos con algunas zonas aisladas de materiales arcillosos y/o orgánicos de alta plasticidad. De acuerdo con los ensayos SPT, el material generalmente presenta valores de N_{SPT} menores a 20. Con respecto a los ensayos CPTu, los valores de la resistencia de punta " q_t " estuvieron comprendidos entre 1 y 10 MPa, correspondiendo los valores más bajos a los materiales finos y orgánicos. En la mayoría del proyecto el fondo de este estrato se encontró a profundidades de entre 4 y 6 metros por debajo del nivel del terreno (a un promedio de aproximadamente 5 m).
- Subyacente al estrato anterior se tiene materiales arenoso finos o con cierto contenido de limos. Este material puede encontrarse hasta profundidades superiores a los 20 metros con respecto de la superficie. De acuerdo con los ensayos SPT, el material generalmente presenta valores de N_{SPT} superiores 25 con algunas zonas aisladas con valores N mayores. Los valores de la resistencia de punta del CPTu han estado comprendidos entre 10 y 30 MPa. En algunos sondeos se ha observado que las partes inferiores de este estrato presentaban materiales arcillosos.
- Subyacente al estrato arenoso puede encontrarse materiales finos predominantemente arcillosos. En este estrato fino los valores N_{SPT} se encontraban comprendidos entre 7 y 20, con lo cual en general era de rígida a muy rígida. Los valores de la resistencia de punta del CPTu, en general presentaron valores entre 1 y 10 MPa. Aunque esta capa estaba compuesta generalmente por arcilla, dentro del estrato se observaron algunas capas y zonas de limo, arena arcillosa o arena limosa en las ubicaciones de algunos sondeos aislados.
- Todos los estratos mencionados se apoyan sobre una formación de lutitas. En el límite con el estrato de arcilla este material se encuentra meteorizado y puede ser considerado como una roca blanda.
- Con respecto a la presencia del agua en la zona de estudio, en las perforaciones se registró que el nivel freático se puede presentar entre 0.9 a 3.4 m medidos desde la superficie.

4.3 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO

A partir de lo mencionado en el acápite 4.1.2 correspondiente a la sismicidad de la zona de estudio, para este trabajo se está considerando dos (02) escenarios de análisis con distintas magnitudes y aceleraciones a nivel de superficie. Además, tomando como base la descripción de la estratigrafía, para el análisis se ha establecido que el nivel freático se encuentra a 1.00 metro desde la superficie del terreno.

Complementariamente, la zona de estudio presenta una topografía relativamente plana y una predominancia de materiales arenosos en los perfiles de suelo. Estas condiciones son compatibles con las metodologías presentadas en el Capítulo 3.0, las cuales se basan principalmente en observaciones de campo de sitios donde se ha observado el fenómeno de licuación:

- Para el análisis de los ensayos SPT se ha empleado las metodologías de Youd e Idriss (2001) y Boulanger e Idriss (2014)
- Para el análisis de los ensayos CPTu se ha empleado las metodologías de Robertson (2009b) y Boulanger e Idriss (2014, 2016).

Asimismo, el análisis de potencial de licuación considera la influencia de los estratos licuables hasta una profundidad máxima de 20 metros (ver acápite 3.6). Esto también es consecuente con las observaciones realizadas para el desarrollo de las metodologías simplificadas, las cuales mencionan que no se ha tenido muchos registros de licuación de suelos a grandes profundidades (Boulanger y Idriss, 2014; Idriss y Boulanger, 2008; Youd y Idriss, 2001).

De lo mencionado, se ha desarrollado la estimación del potencial de licuación de la zona de estudio a partir de los sondajes SPT y CPTu. En los siguientes acápites se presentan los resultados obtenidos, considerando las particularidades de cada ensayo.

4.3.1 Estimación del potencial de licuación empleando ensayos SPT

La estimación del LPI a partir del SPT está directamente influenciado por el valor del $(N_1)_{60cs}$ el cual es fundamental para la obtención del CRR. Como se ha mencionado en el acápite 3.3.1, para la estimación del $(N_1)_{60cs}$ se requiere el empleo de ciertos parámetros de corrección (ver Tabla 3.3), de los cuales uno de los más importantes es la corrección de la energía del martillo o C_E .

En un contexto ideal, durante los trabajos de campo se debería de realizar mediciones de energía del martillo durante la ejecución de los ensayos SPT. Sin embargo, en la gran mayoría de proyectos desarrollados en nuestro país no se lleva a cabo dicha actividad, principalmente por la falta de implementación tecnológica de equipos y herramientas adecuados para las mediciones. A esto hay que sumarle la falta de control de los equipos y la “pericia” o habilidad de los operarios al momento de ejecutar los ensayos.

Esto genera que se tenga valores de N_{spt} que no se pueden corregir adecuadamente, generando una incertidumbre en la obtención del $(N_1)_{60cs}$. Por lo tanto, se tendrían proyecciones deficientes con respecto al LPI.

A fin de analizar la influencia del valor del C_E , para el presente trabajo se ha considerado tres valores de corrección por energía: 0.50 (mínimo), 0.75 (intermedio) y 1.00 (máximo). Estos valores han sido tomados considerando que los sondajes ejecutados en el área de interés han empleado un martillo tipo dona (ver Tabla 3.3) y que no se ha realizado medición de energía alguna.

A partir de lo mencionado, en las Figuras 4.4 a la 4.9 se muestran los resultados de obtención del LPI para todos los sondajes ejecutados en la zona de estudio:

Escenario 01: 7.0 Mw – 0.30 g

En la Figura 4.4 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_E igual a 0.50. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 16.5 y 40.5 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 19.1 y 42.7. De la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (entre 1.7 a 4.5). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación muy alto considerando un valor de C_E igual a 0.50.

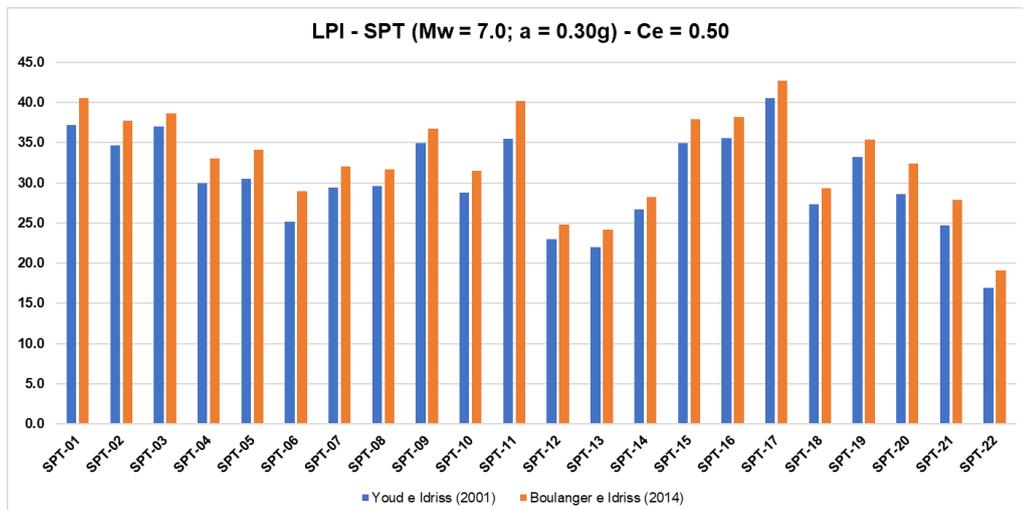


Figura 4.4: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – $C_E = 0.50$ (Mínimo).

En la Figura 4.5 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_E igual a 0.75. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 5.6 y 22.4 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 7.1 y 23.4. Similar al caso anterior, de la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (entre 0.1 a 3.4). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación alto a muy alto considerando un valor de C_E igual a 0.75.

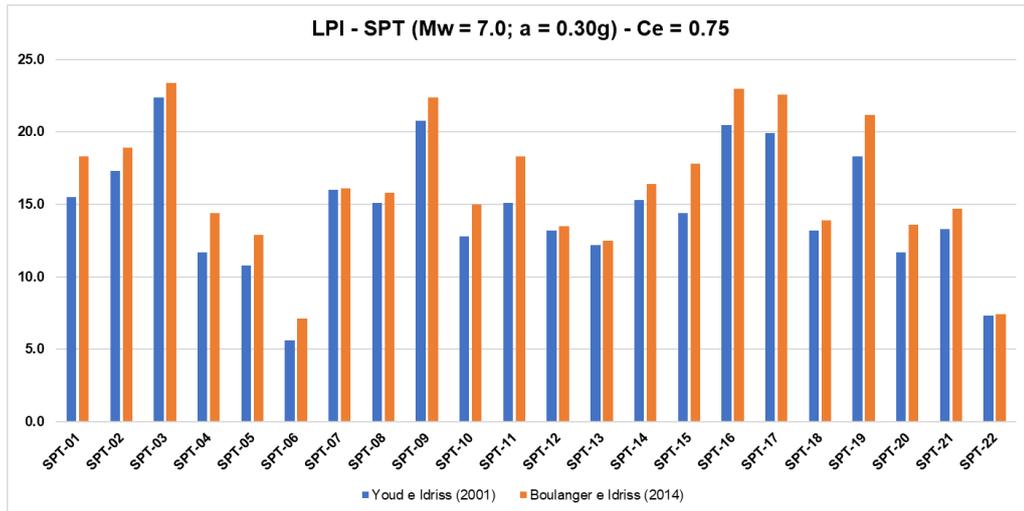


Figura 4.5: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – $C_e = 0.75$ (Intermedio).

En la Figura 4.6 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_e igual a 1.00. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 2.1 y 15.4 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 3.2 y 15.7. De forma similar a los casos anteriores, de la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (hasta 2.2). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación generalmente alto con algunos sondajes que presentan un riesgo bajo y puntualmente dos (02) con un riesgo muy alto. Para todos estos resultados se ha considerado un valor de C_e igual a 1.00.

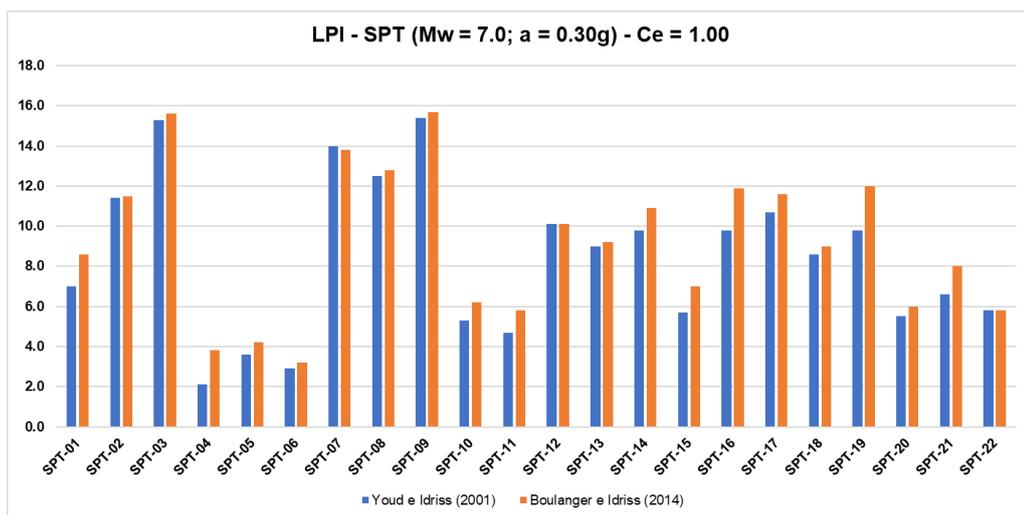


Figura 4.6: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 01 – $C_e = 1.00$ (Máximo).

Escenario 02: 8.0 Mw – 0.45 g

En la Figura 4.7 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_E igual a 0.50. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 37.2 y 64.3 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 43.8 y 62.0. De la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (hasta 6.6). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación muy alto.

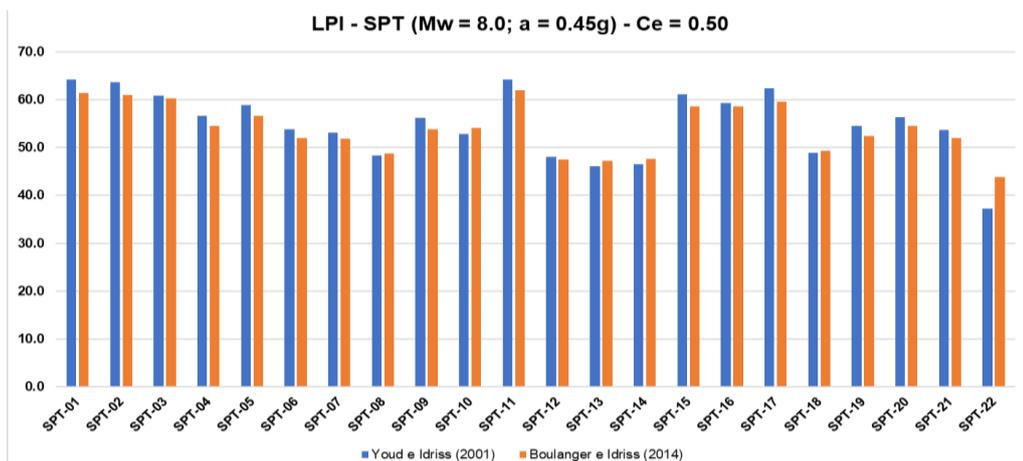


Figura 4.7: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – $C_E = 0.50$ (Mínimo).

En la Figura 4.8 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_E igual a 0.75. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 19.2 y 51.3 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 22.2 y 50.3. Similar al caso anterior, de la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (hasta 4.1). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación muy alto.

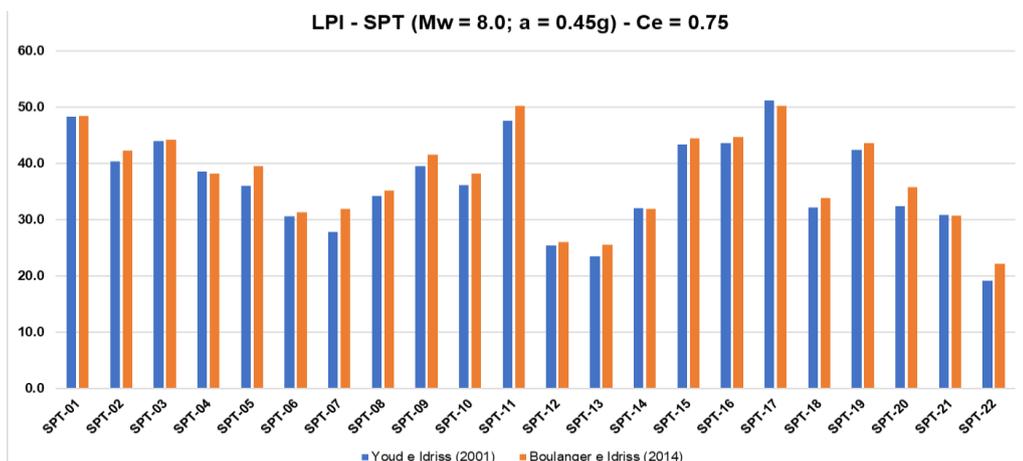


Figura 4.8: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – $C_E = 0.75$ (Intermedio).

En la Figura 4.9 se presentan los resultados de la estimación del LPI considerando un valor de C_E igual a 1.00. Para la metodología de Youd e Idriss (2001) se están teniendo valores comprendidos entre 11.6 y 32.1 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) se tienen valores entre 10.9 y 31.7. De forma similar a los casos anteriores, de la figura se puede apreciar que existen pequeñas diferencias entre los resultados de ambas metodologías (hasta 4.9). De acuerdo con la Tabla 3.8, la zona de estudio presenta un riesgo de licuación generalmente alto a muy alto.

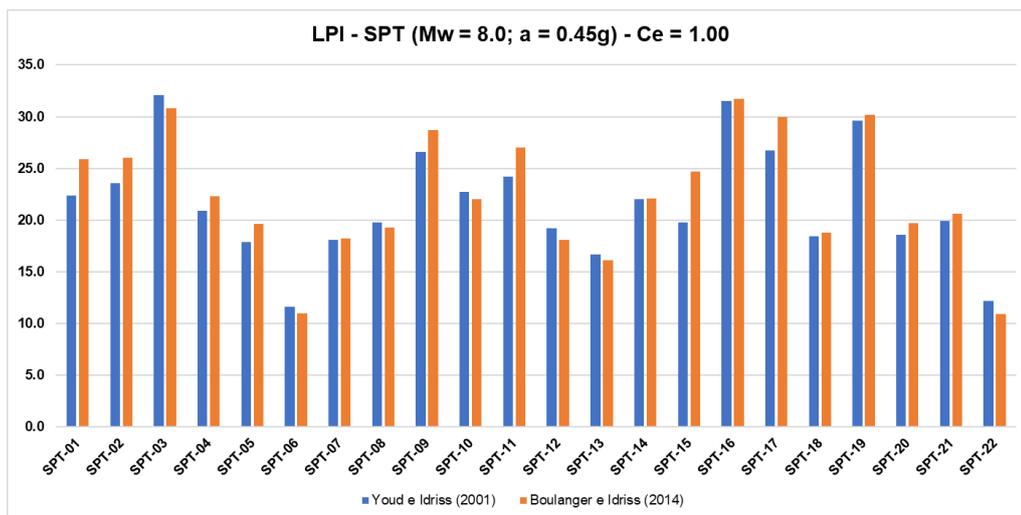


Figura 4.9: Estimación del LPI a partir de ensayos SPT – Escenario 02 – $C_E = 1.00$ (Máximo).

4.3.2 Estimación del potencial de licuación empleando ensayos CPTu

A continuación, se presentan los resultados de la estimación del LPI de la zona de estudio empleando ensayos CPTu. Estos, a diferencia de los ensayos SPT, no requieren una medición de energía para corregir sus resultados por lo que no va a ser necesario realizar “sub escenarios”. Además que la data que brinda el CPTu es continua a lo largo de la profundidad de investigación y presenta resultados mucho más consistentes cuando se analizan puntos muy cercanos a diferencia del SPT cuyas mediciones son en determinados puntos y están sujetas a grandes variaciones (Jefferies y Davies, 1993).

Escenario 01: 7.0 Mw – 0.30 g

En la Figura 4.10 se presentan los resultados de la estimación del LPI para el Escenario 01. Para la metodología de Robertson (2009b) se están teniendo valores comprendidos entre 0.6 y 7.9 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) se tienen valores entre 1.9 y 18.7. De estos valores se aprecia que existen diferencias relativamente considerables de hasta 12.1 unidades entre los resultados de ambas metodologías.

De acuerdo con la Tabla 3.8, para la metodología de Robertson (2009b) se tiene un riesgo de licuación predominantemente bajo con algunos puntos de riesgo alto. Mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) se tienen sondajes con un riesgo bajo y riesgo alto en proporciones similares.

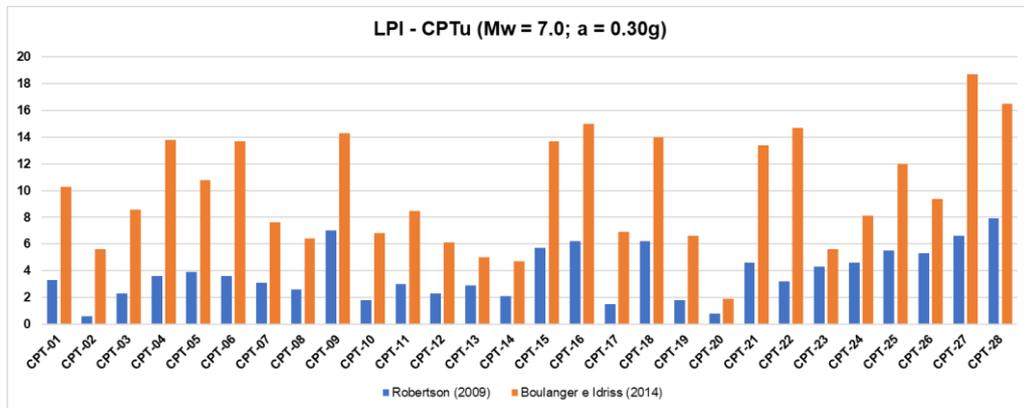


Figura 4.10: Estimación del LPI a partir de ensayos CPTu – Escenario 01.

Escenario 02: 8.0 Mw – 0.45 g

En la Figura 4.11 se presentan los resultados de la estimación del LPI para el Escenario 02. Para la metodología de Robertson (2009b) se están teniendo valores comprendidos entre 13.9 y 30.8 mientras que para la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) se tienen valores entre 12.6 y 36.9. De estos valores se aprecia que existen diferencias relativamente considerables de hasta 11 unidades entre los resultados de ambas metodologías.

De acuerdo con la Tabla 3.8, para la metodología de Robertson (2009b) se tiene un riesgo de licuación predominantemente muy alto con algunos puntos de riesgo alto. Similares resultados se obtienen para la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016).

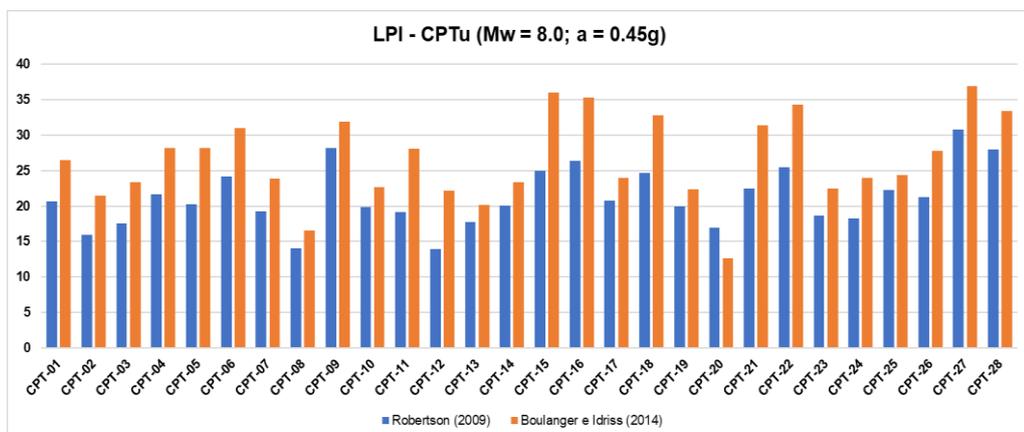


Figura 4.11: Estimación del LPI a partir de ensayos CPTu – Escenario 02.

A partir de lo mencionado en los últimos acápites, se comenta lo siguiente acerca de los valores de LPI obtenidos del análisis:

- Los valores de LPI obtenidos para los ensayos SPT en ambas metodologías empleadas son similares. Esto también considera a los valores obtenidos de los sub escenarios generados para analizar la corrección por energía. La diferencia entre resultados es mínima.
- Para el análisis de los ensayos SPT, la metodología de Youd e Idriss (2001) genera valores de LPI menores que la de Boulanger e Idriss (2014) en el Escenario 01. Lo inverso sucede en el Escenario 02 donde la segunda metodología suele presentar mayores valores. Para ambos escenarios, las diferencias entre metodologías son realmente mínimas.
- Los valores de LPI obtenidos para los ensayos CPTu presentan variaciones significativas entre ambas metodologías empleadas. En ambos escenarios, la metodología de Robertson (2009b) suele brindar valores menores a los que arroja Boulanger e Idriss (2014, 2016).
- Para la zona de estudio, la ocurrencia de sismos moderados, con magnitudes y aceleraciones del orden de 7.0 y 0.3g respectivamente, generan un potencial de la licuación con riesgos ligeramente variables. Pueden existir zonas con un bajo riesgo de licuación mientras que otras pueden presentar un riesgo alto a muy alto.
- Por otro lado, toda la zona de estudio presenta una probabilidad de licuación muy alta para sismos severos con magnitudes Mw y aceleraciones del orden de 8.0 y 0.45g respectivamente.
- De esto también se concluye que sismos con periodos de retorno elevados generan en la zona de estudio una probabilidad muy alta a la licuación.

A fin de ahondar un poco más en el porqué de estas diferencias, en el siguiente capítulo se ha realizado un análisis acerca de las diferencias observadas entre las metodologías evaluadas.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos para la estimación del potencial de licuación de la zona de estudio, en el presente acápite se ha desarrollado un análisis a partir de las formulaciones presentadas en el Capítulo III. Se ha comparado los resultados de las metodologías empleadas considerando los dos escenarios sísmicos analizados. A partir de los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis comparativo entre las metodologías con la finalidad de establecer las más adecuadas.

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS SPT

En el Anexo A se encuentran adjuntos los resultados del análisis del LPI para cada uno de los veintidós (22) ensayos recopilados para el presente estudio. En los siguientes acápites se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada escenario analizado y para cada corrección de energía adoptada.

5.1.1 Metodología de Youd e Idriss (2001)

De la Figura 5.1 a la Figura 5.6 se muestra una compilación de resultados de estimación de LPI considerando la metodología propuesta por Youd e Idriss (2001). Tal y como se ha observado en el capítulo anterior, mientras menor sea el factor de corrección por energía del martillo, mayor será el potencial de licuación. Además, de las gráficas de LPI puede observarse que, para el área de interés, los estratos más superficiales son los que más incrementan el valor del potencial de licuación. Esto también es concordante con lo presentado en el acápite 3.6 y la ecuación (3.48), de la cual se puede concluir que a medida que aumenta la profundidad, menor es el aporte del estrato licuable al LPI.

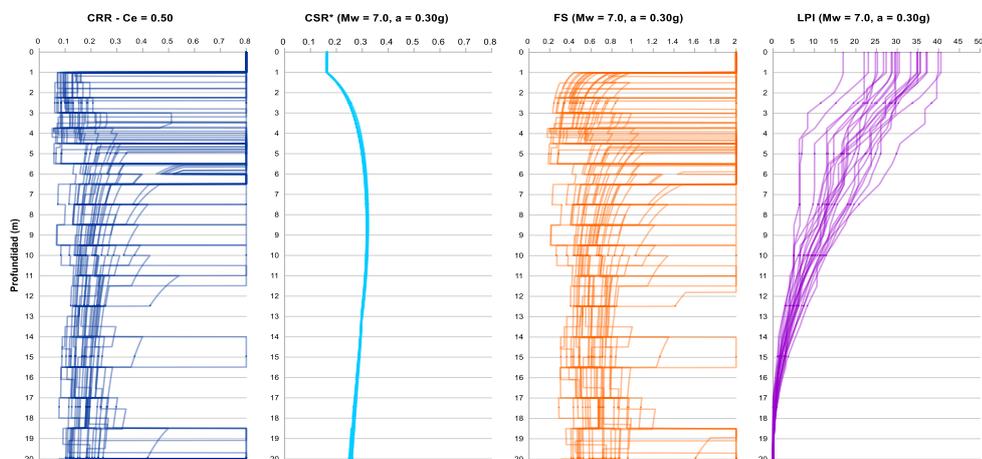


Figura 5.1: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E= 0.50$ - Metodología de Youd e Idriss.

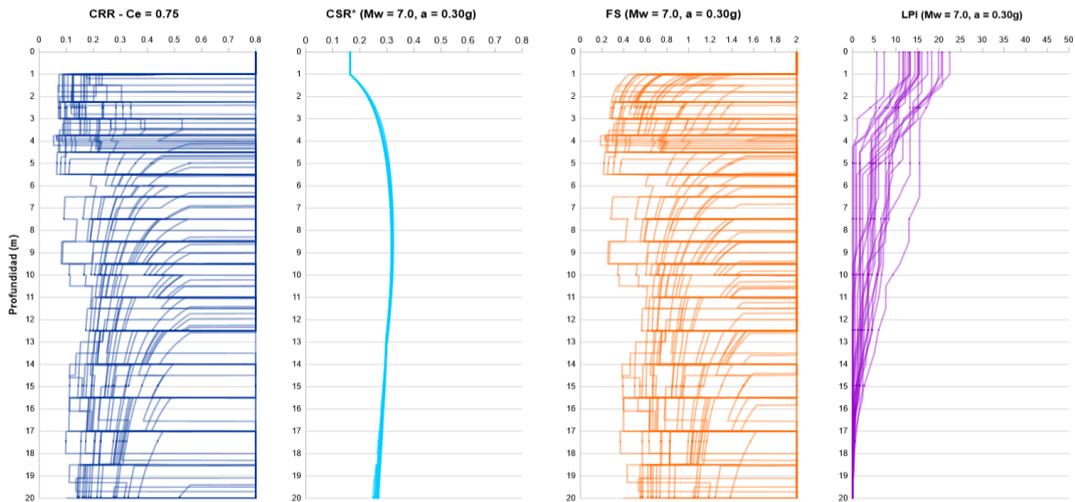


Figura 5.2: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E= 0.75$ – Metodología de Youd e Idriss.

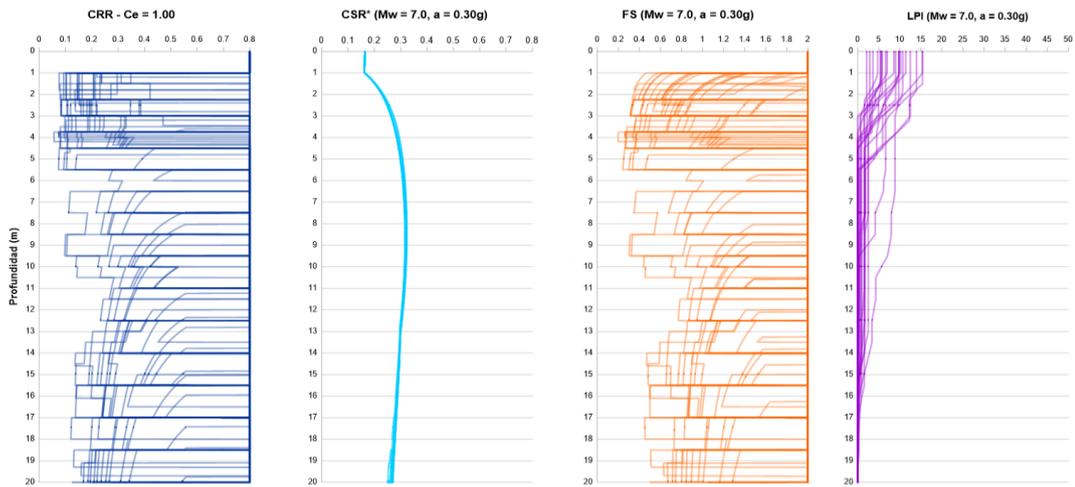


Figura 5.3: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E= 1.00$ - Youd e Idriss.

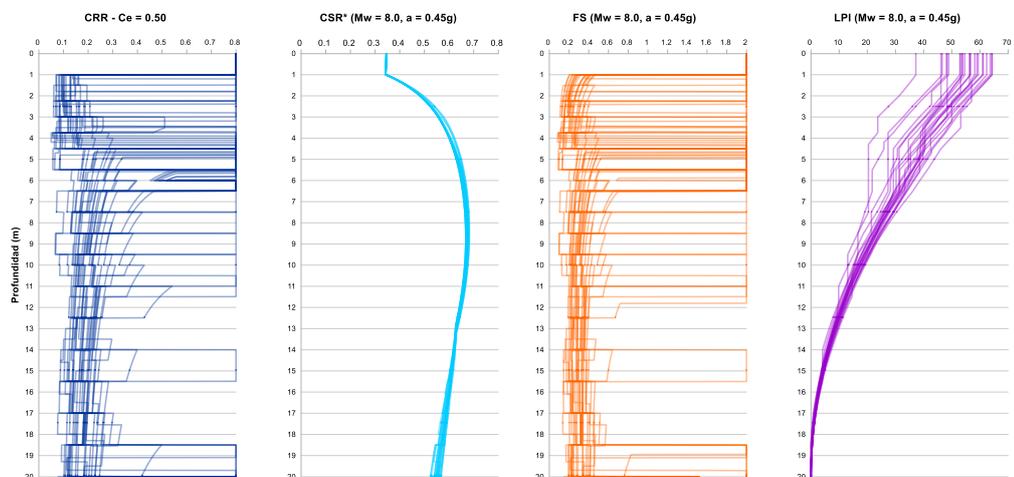


Figura 5.4: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E= 0.50$ - Metodología de Youd e Idriss.

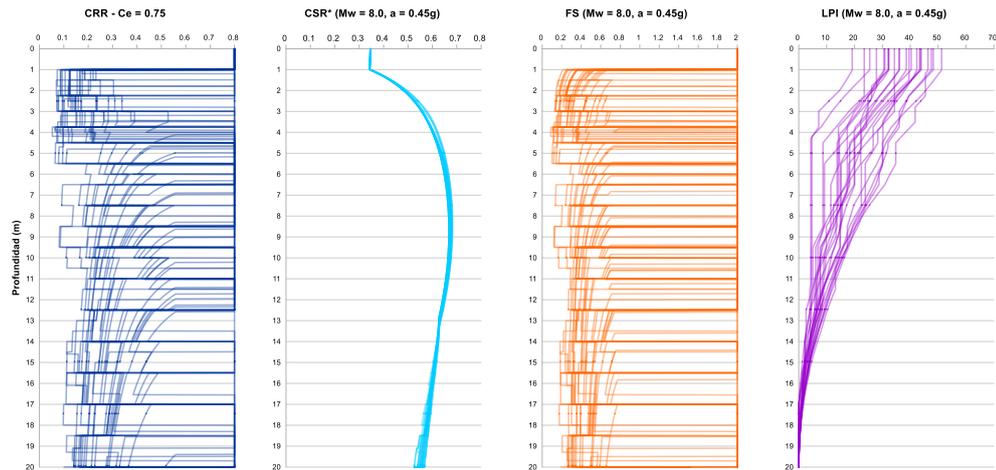


Figura 5.5: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E= 0.75$ - Metodología de Youd e Idriss.

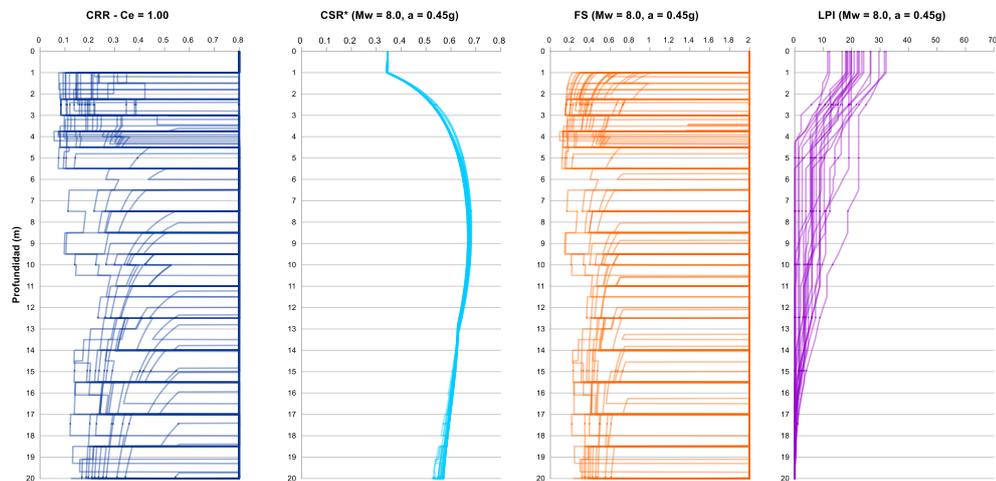


Figura 5.6: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E= 1.00$ - Metodología de Youd e Idriss.

Con respecto a las gráficas del CSR* desarrolladas a partir de las expresiones del Acápite 3.5.4, se puede observar que, para las seis figuras mostradas, se presenta de una forma homogénea y con pocas variaciones. Esto se debe a que el valor del MSF para la metodología de Youd e Idriss (2001) es constante ya que solo depende de la magnitud del sismo analizado (ver Tabla 3.6). De forma similar, para la zona de estudio el valor de K_σ presenta una influencia moderada en la estimación del potencial de licuación.

5.1.2 Metodología de Boulanger e Idriss (2014)

Desde la Figura 5.7 a la Figura 5.12 se presenta el resumen de resultados de la estimación del LPI empleando la metodología de Boulanger e Idriss (2014). De forma similar a la metodología anterior, los valores de LPI aumentan a medida que disminuye la corrección por energía de martillo.

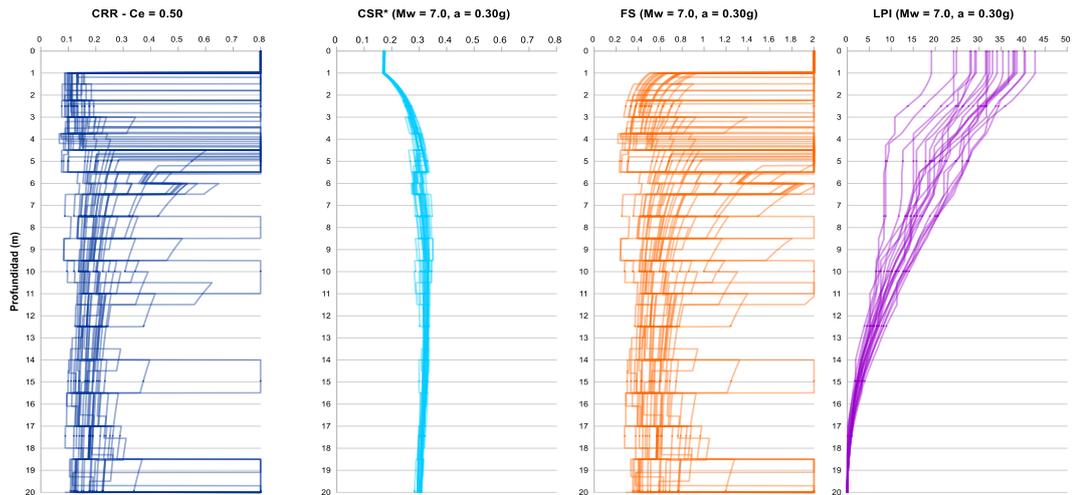


Figura 5.7: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E = 0.50$ - Metodología de Boulanger e Idriss.

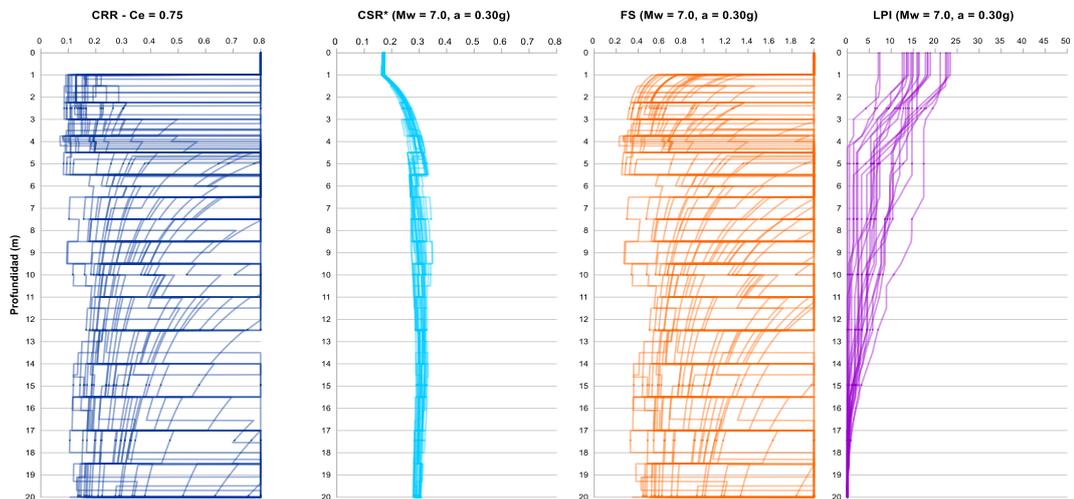


Figura 5.8: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E = 0.75$ - Metodología de Boulanger e Idriss.

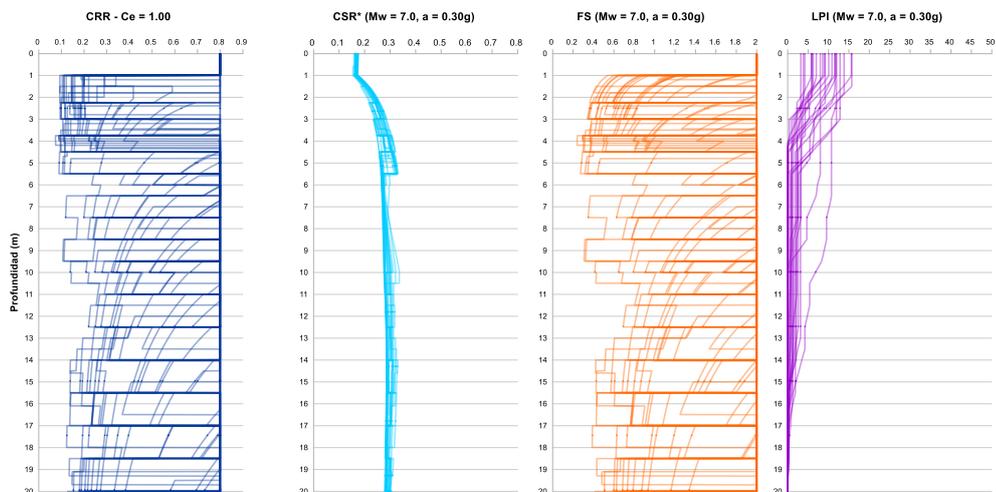


Figura 5.9: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 01 $C_E = 1.00$ - Metodología de Boulanger e Idriss.

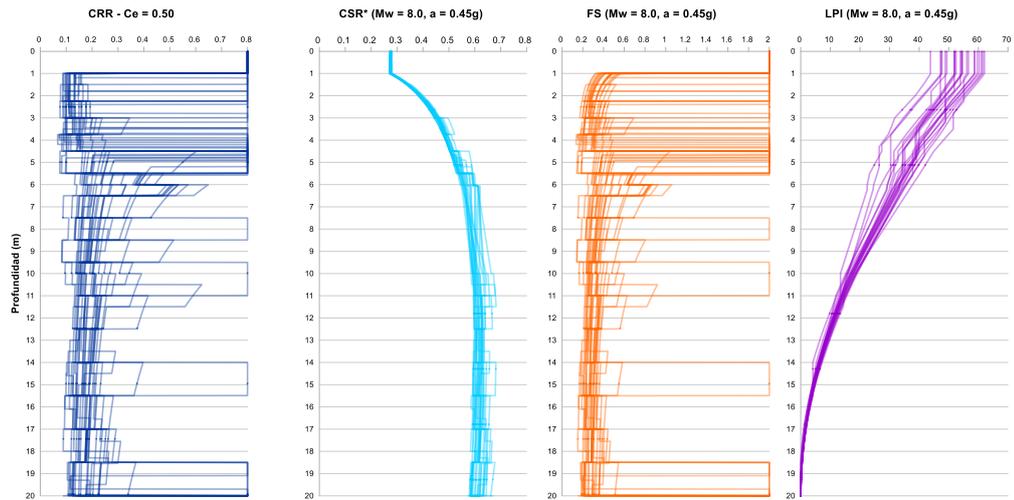


Figura 5.10: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E = 0.50$
 - Metodología de Boulanger e Idriss.

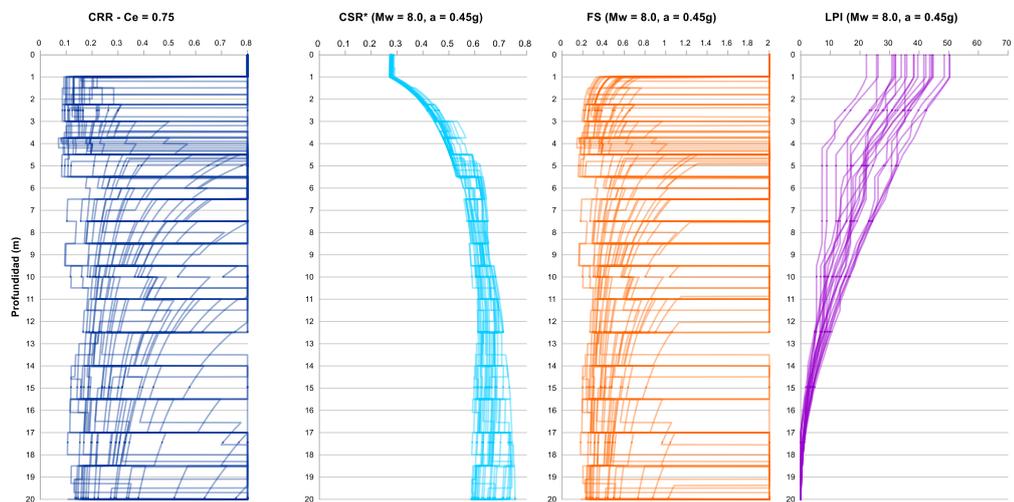


Figura 5.11: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E = 0.75$
 - Metodología de Boulanger e Idriss.

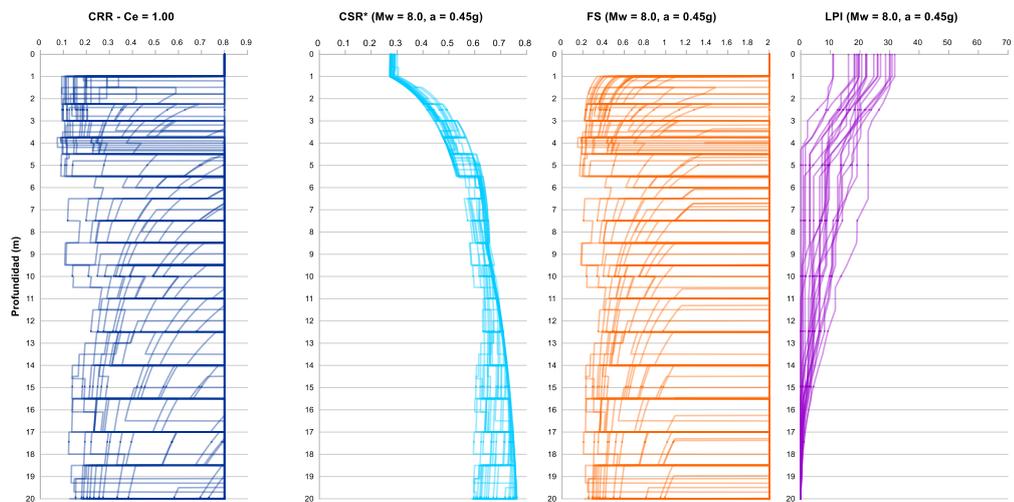


Figura 5.12: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de SPT – Escenario 02 $C_E = 0.75$
 - Metodología de Boulanger e Idriss.

Con respecto a las gráficas del CSR* desarrolladas a partir de las expresiones del Acápite 3.5.4, se puede observar que para las seis figuras mostradas se presentan variaciones a lo largo de la profundidad de análisis. Esto se puede explicar debido a que el valor del MSF para la metodología de Boulanger e Idriss (2014) es dependiente no solo de la magnitud del sismo sino también del valor de $(N_1)_{60cs}$ y por ende indirectamente está ligado a la corrección por energía del martillo. (ver Tabla 3.6). Esto también es aplicable para el valor de K_σ , cuyas expresiones presentadas en el acápite 3.5.2 también son dependientes del valor de $(N_1)_{60cs}$.

5.1.3 Comparación entre metodologías

A pesar de las diferencias señaladas entre las gráficas, los resultados finales del LPI de las dos metodologías empleadas arrojan resultados bastante similares para los dos escenarios considerados (ver acápite 4.3.1). A fin de analizar esta situación, en la Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15 se presentan las comparaciones entre los valores de $(N_1)_{60cs}$ estimados para cada metodología aplicada en la estimación del LPI.

Como se aprecia en las figuras mencionadas, la diferencia entre resultados de $(N_1)_{60cs}$ es mínima, encontrándose una mayor diferencia cuando se considera factores de corrección por energía de martillo más altas (ver Figura 5.15). Esto es importante ya que el CRR se estima a partir del $(N_1)_{60cs}$.

Recordando lo mencionado en acápites anteriores, estas metodologías han sido desarrolladas a partir de observaciones y mediciones de casos históricos en los lugares donde se ha presentado licuación durante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud. Las expresiones desarrolladas por las metodologías empleadas se ajustan a la data histórica disponible durante el momento de su desarrollo.

Para el análisis de las metodologías empleadas basadas en ensayos SPT, en la Figura 5.16 se presentan las curvas de licuación generadas a partir de las ecuaciones (3.2) y (3.5) junto con los casos históricos reportados en los trabajos de Boulanger e Idriss (2014) ya que estos presentan una data histórica más actualizada.

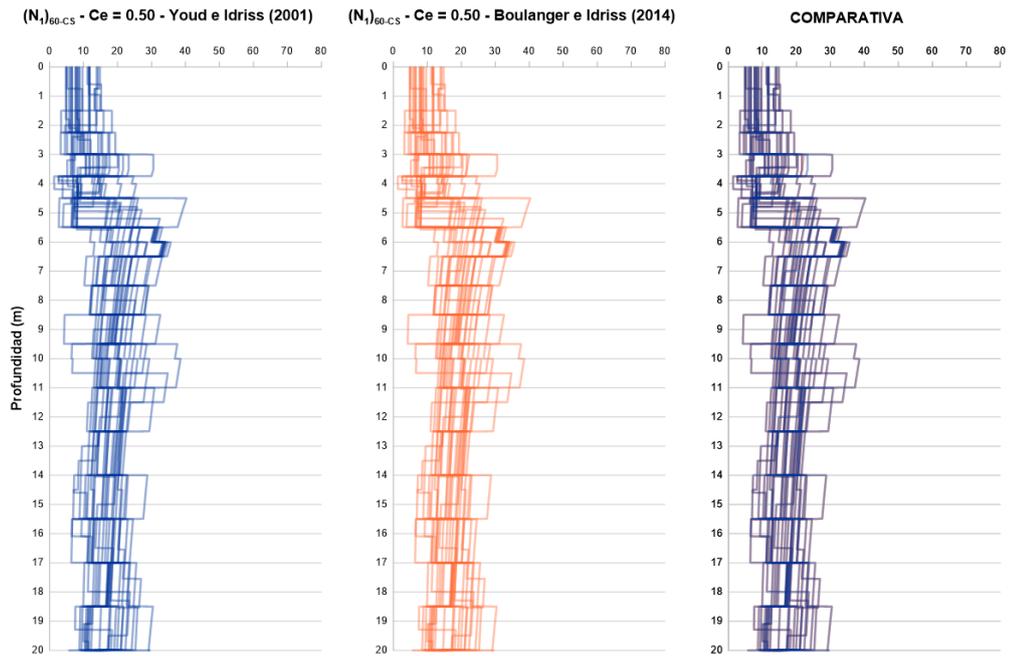


Figura 5.13: Comparación de valores de $(N_1)_{60-CS} - C_E = 0.50$.

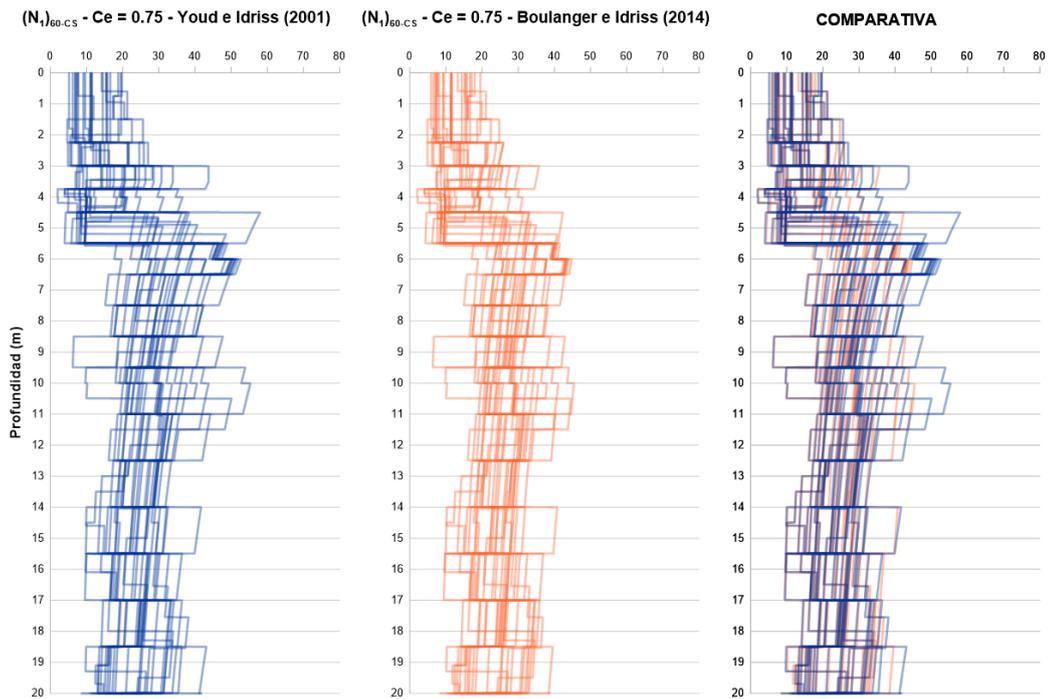


Figura 5.14: Comparativa de valores de $(N_1)_{60-CS} - C_E = 0.75$.

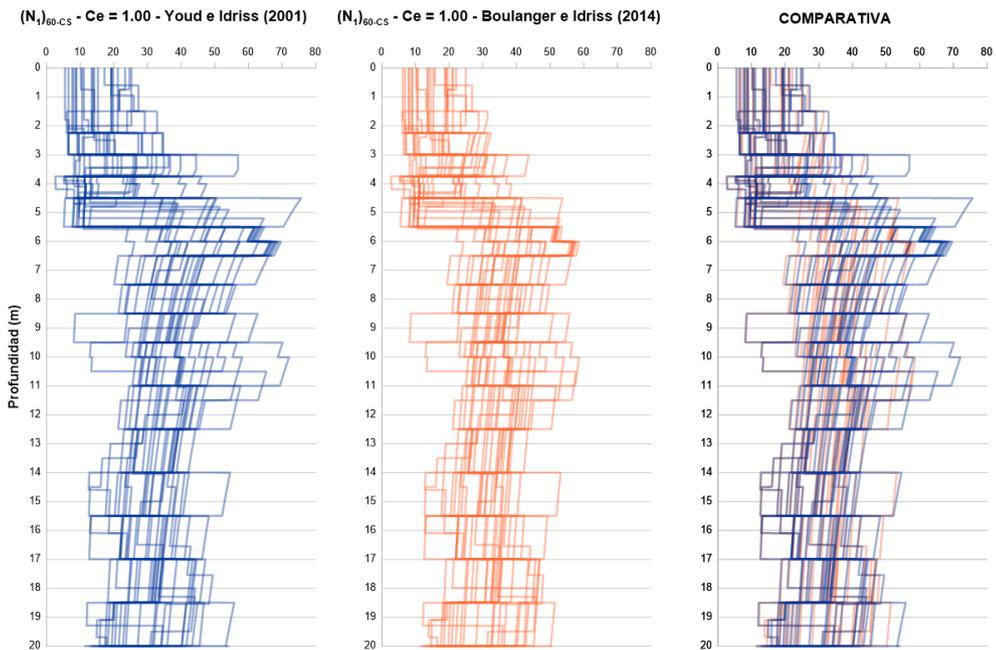


Figura 5.15: Comparativa de valores de $(N_1)_{60-CS} - C_E = 1.00$.

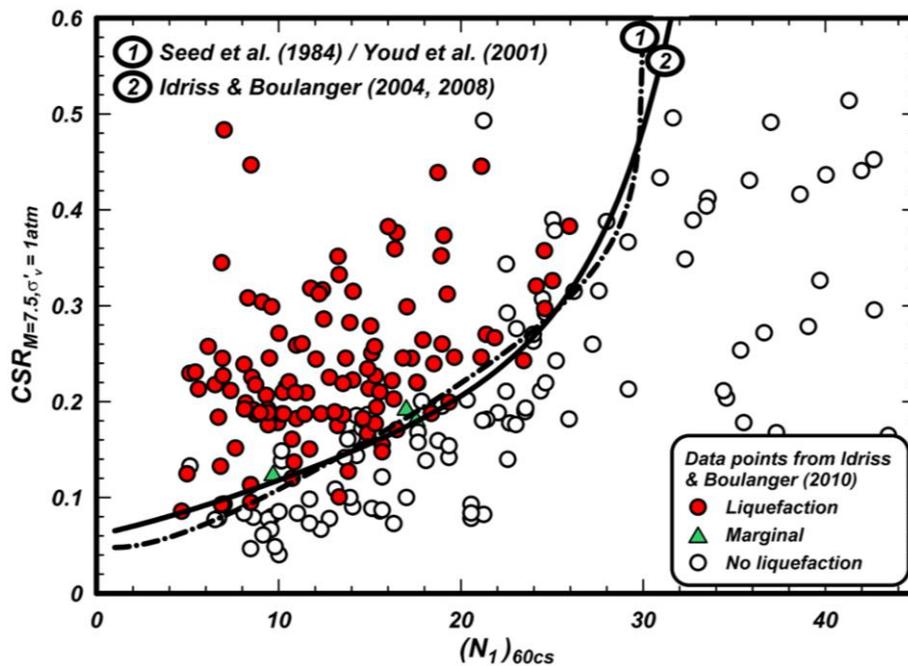


Figura 5.16: Representación gráfica de curvas de licuación, incluyendo casos históricos
Fuente: Boulanger e Idriss (2014).

Ambas curvas mostradas presentan una forma muy semejante entre sí, por lo que valores cercanos de $(N_1)_{60cs}$ podrían brindar resultados similares. Considerando lo mencionado, no es raro encontrar que los resultados de la estimación del LPI de ambas metodologías empleadas sean semejantes entre sí. Por otro lado, considerando una mayor rigurosidad, es posible considerar que la curva desarrollada por Boulanger e Idriss (2014) fue desarrollada con una data histórica

más actualizada que la de Youd e Idriss (2001). De forma complementaria, en la Figura 5.17 se muestra una gráfica con la representación de las curvas de CRR desarrolladas para cada metodología.

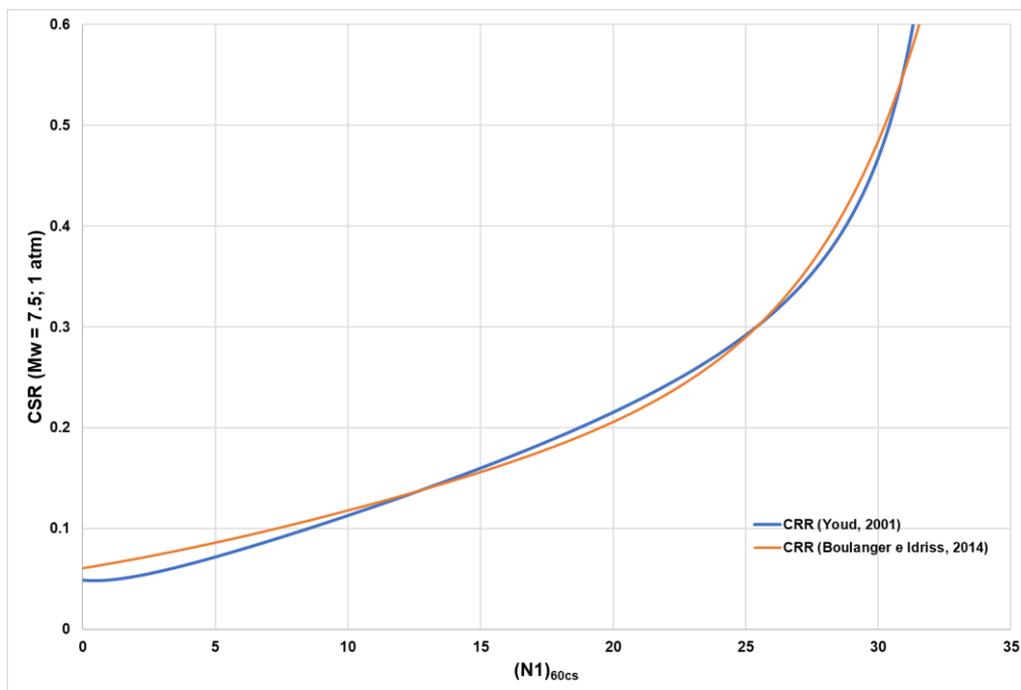


Figura 5.17: Representación gráfica curvas de licuación.

De lo expuesto, podemos concluir que al menos en la zona de estudio analizada, ambas metodologías presentan resultados prácticamente iguales y no se ha encontrado diferencias notables en la estimación del LPI. Esto a pesar de las diferencias observadas en las formulaciones para cada metodología. A partir de lo mencionado y con fines de análisis, para la presente investigación se ha considerado a la metodología de Boulanger e Idriss (2014) desarrollada para ensayos SPT como la más adecuada para la estimación del potencial de licuación en la zona de estudio. Esto también va de la mano con el hecho que esta metodología ha sido realizada con una base de datos histórica más actualizada.

Por otro lado, lo que si viene a ser un poco más relevante en la estimación del LPI empleando ensayos SPT es el factor de corrección por energía C_E ya que variaciones en este valor pueden conducir a resultados muy variables entre sí. De los resultados presentados se observa que mientras menor es el valor de C_E más susceptible a la licuación es el perfil de suelo. Por lo tanto, considerar un valor de corrección mayor al que realmente tiene el equipo puede conllevar a que un estrato que es potencialmente licuable sea considerado como no licuable.

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CPTu

En el Anexo B se ha adjuntado los resultados del análisis de potencial de licuación para los veintiocho (28) ensayos recopilados para el presente estudio. De igual forma que para los ensayos SPT, en los siguientes acápite se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada escenario analizado.

5.2.1 Metodología de Robertson (2009b)

En la Figura 5.18 y la Figura 5.19 se muestran un compilado de los resultados del análisis de potencial de licuación de acuerdo con la metodología de Robertson (2009b) para los dos escenarios considerados.

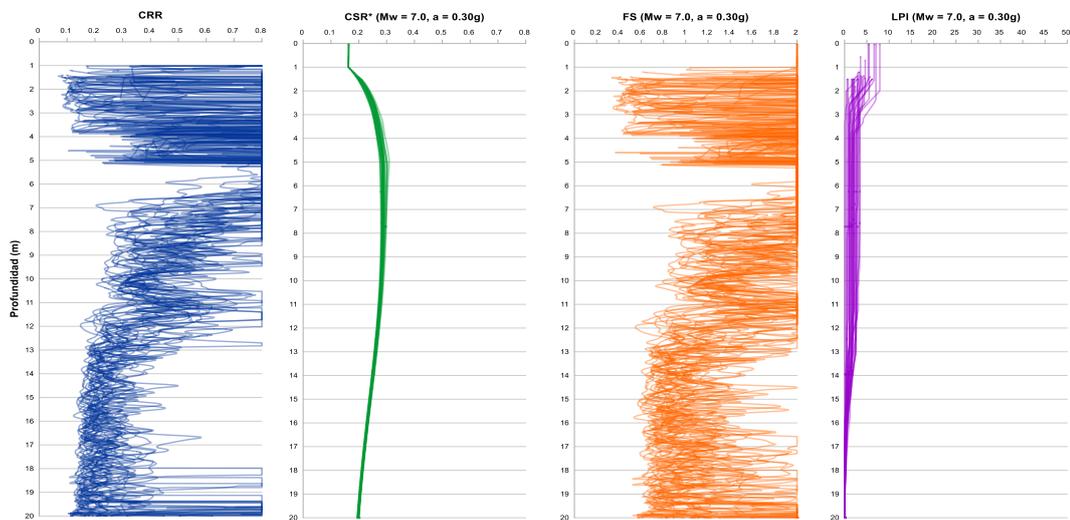


Figura 5.18: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 01 – Metodología de Robertson

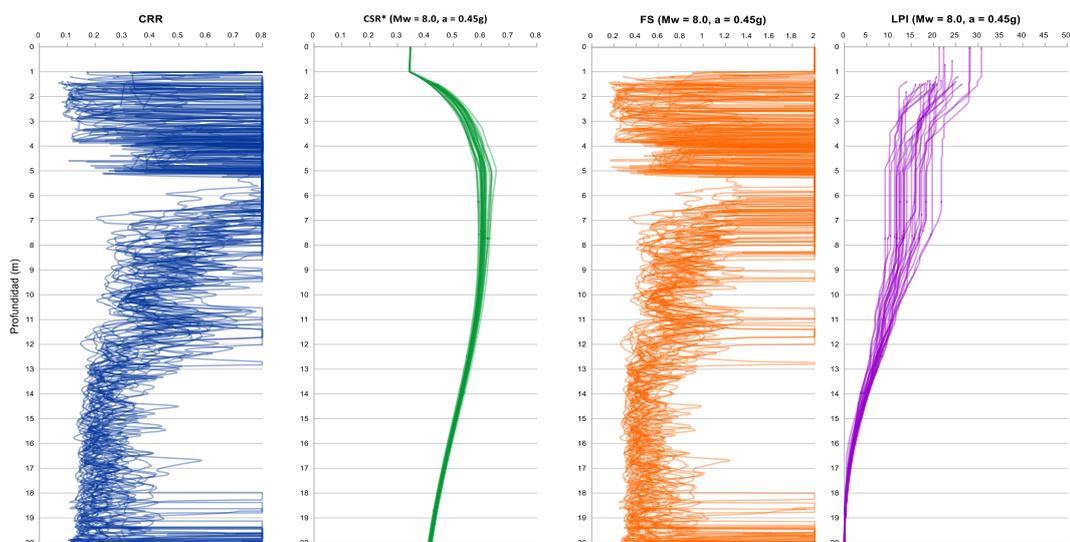


Figura 5.19: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 02 – Metodología de Robertson

Para ambos escenarios se observa que la data presenta cierta tendencia en los resultados del análisis para la obtención del LPI, a diferencia de los ensayos SPT que presentaban una dispersión considerable. De forma similar a la metodología de Youd e Idriss (2001), el valor del MSF considerado por Robertson (2009b) es dependiente de la magnitud momento, por lo que es un valor constante (ver Tabla 3.6). Debido a esto el valor del CSR* para todos los ensayos analizados es prácticamente uniforme.

5.2.2 Metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016)

En la Figura 5.20 y la Figura 5.21 se presenta un compilado de los resultados del análisis de potencial de licuación de acuerdo con la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) para los dos escenarios considerados.

En ambos escenarios se observa que la data presenta una dispersión ligeramente menor en los resultados del análisis para la obtención del LPI. Esto a diferencia de los ensayos SPT de la misma metodología los cuales presentan una dispersión mucho más notable. Las gráficas del CSR* presentan saltos o variaciones debido a que los valores de MSF son dependientes de la magnitud y del valor del $q_{c1N,cs}$ (ver Tabla 3.6), además de la influencia del K_{σ} , el cual también es dependiente del $q_{c1N,cs}$.

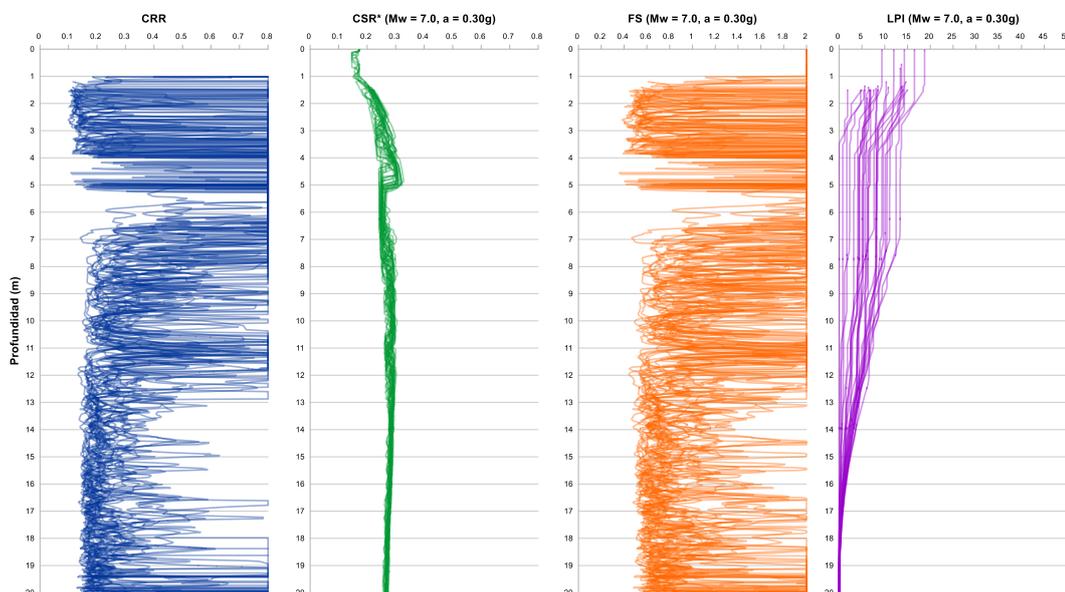


Figura 5.20: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 01 – Metodología de Boulanger e Idriss

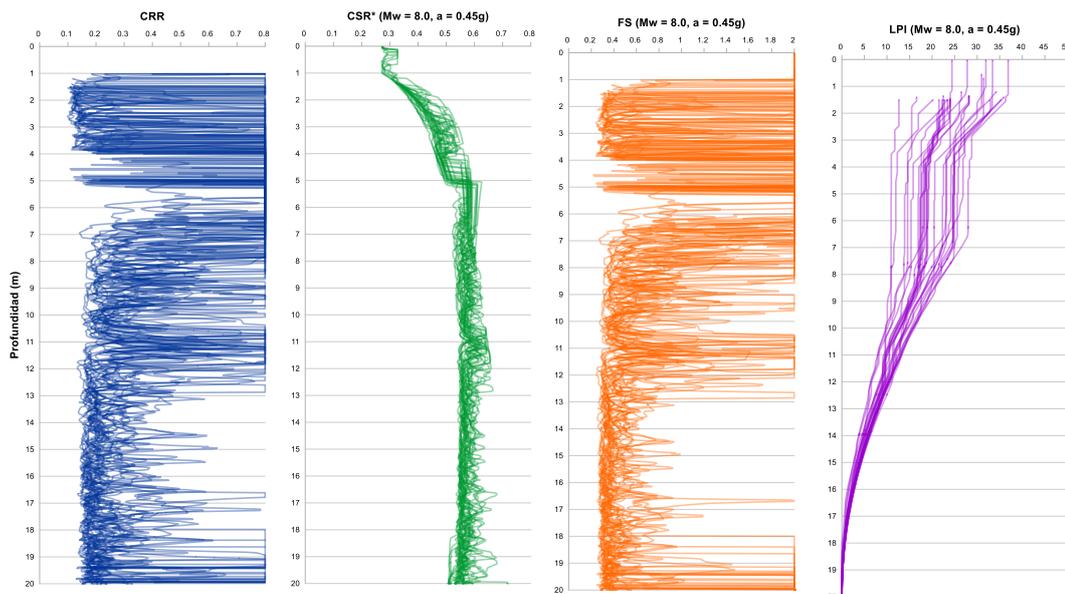


Figura 5.21: Resumen de resultados - Estimación del LPI a partir de CPTu – Escenario 02 – Metodología de Boulanger e Idriss

5.2.3 Comparación entre metodologías

La estimación del CRR para los ensayos CPTu depende de parámetros distintos de acuerdo a cada metodología. Para la metodología de Robertson (2009b) se hace uso del valor de $Q_{tn,cs}$ mientras que para Boulanger e Idriss (2014, 2016) se hace uso del valor de q_{c1Ncs} . Ambas expresiones hacen referencia a una resistencia por punta de cono normalizada para arenas limpias, sin embargo, las expresiones y los criterios para obtener cada una de estas son completamente distintos.

Considerando lo mencionado y a fin de analizar las diferencias entre los resultados de ambas metodologías presentadas en el acápite 4.3.2, en la Figura 5.22 se ha mostrado una comparación entre los valores de $Q_{tn,cs}$ y q_{c1Ncs} obtenidos para todos los sondajes CPTu analizados. De esta figura puede observarse que en los estratos más superficiales los valores de q_{c1Ncs} son relativamente bajos en comparación con los valores de $Q_{tn,cs}$. Por otro parte, a mayores profundidades ambos valores presentan resultados muy semejantes y con muy baja dispersión.

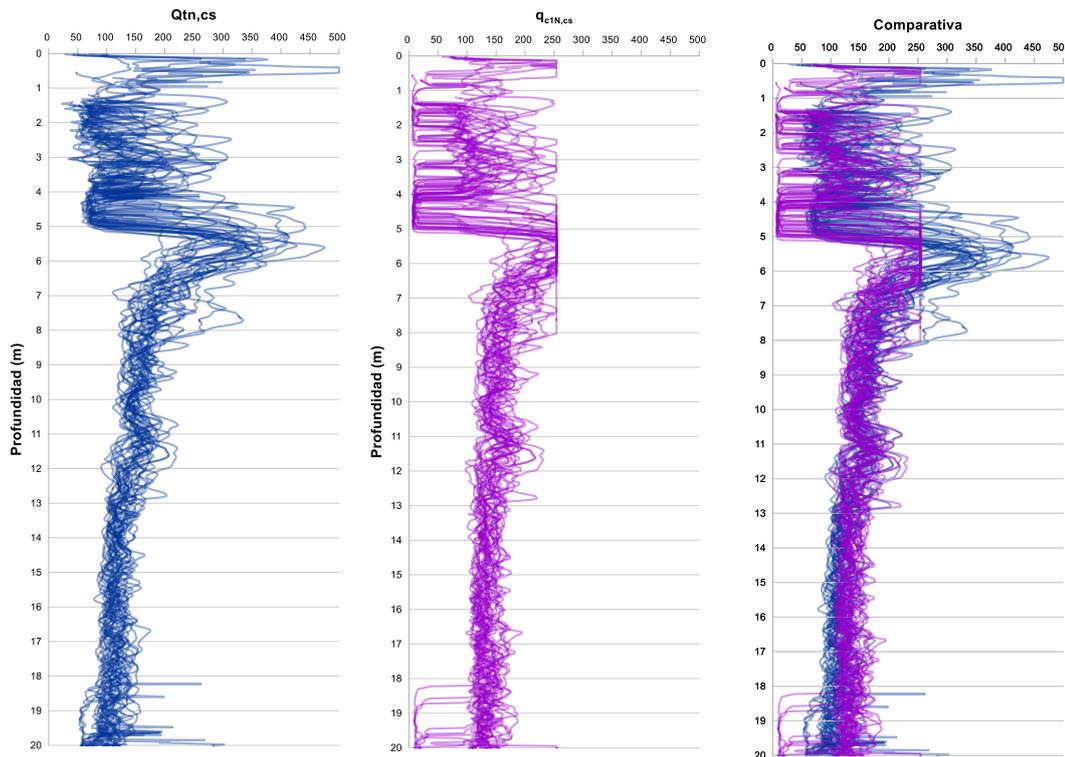


Figura 5.22: Comparativa entre valores de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$.

A pesar de la semejanza que puede existir entre ambos valores a profundidad cabe aclarar que no necesariamente resultados similares de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$ van a brindar valores de CRR iguales. Esto se puede observar en la gráfica Figura 5.23 en la que se ha representado las ecuaciones para la estimación del CRR según las expresiones de las ecuaciones (3.19), (3.20) y (3.27). De acuerdo con estas gráficas, para valores de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$ de hasta 80 podemos esperar resultados similares. Sin embargo, para valores superiores entre 100 y 160 podemos esperar diferencias notables, siendo menores los brindados por la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016). Esto es relevante ya que para profundidades mayores de los 6 metros se están teniendo valores de $Q_{tn,cs}$ y $q_{c1N,cs}$ entre 100 y 200. Además se está observando que a nivel de superficie, la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) presenta valores de $q_{c1N,cs}$ notablemente más bajos que los valores de $Q_{tn,cs}$ obtenidos a partir de la metodología de Robertson (2009b). Esto indica que esta última metodología estaría brindando valores de CRR más altos, generando así un aumento del factor de seguridad contra la licuación y por ende un menor LPI.

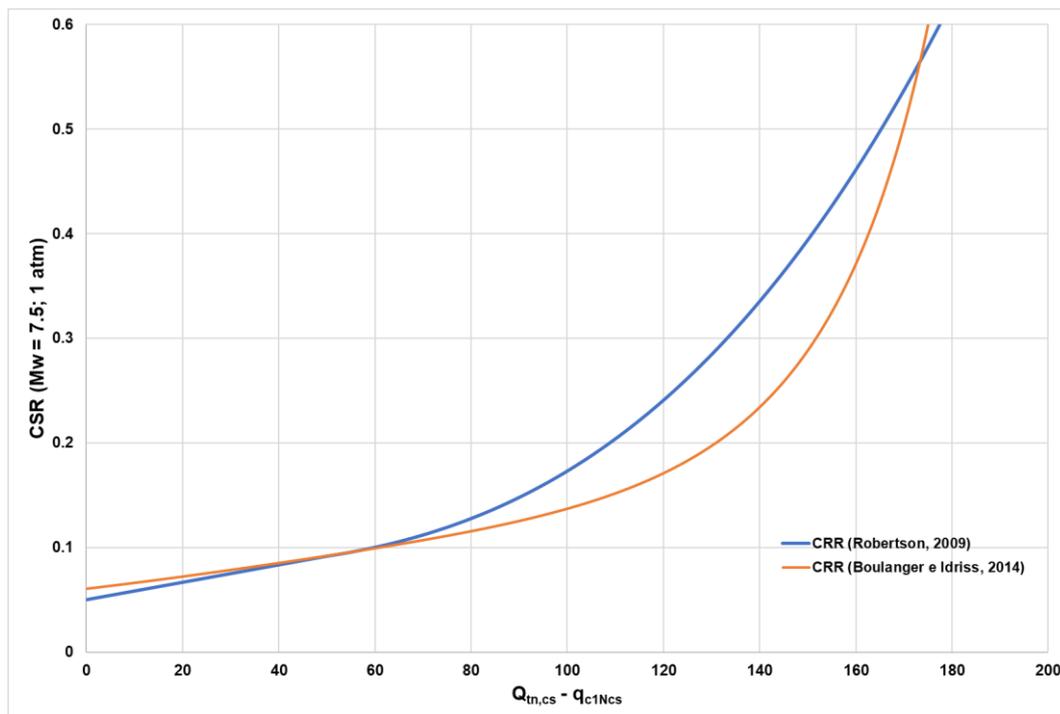


Figura 5.23: Comparativa entre las curvas de licuación de $Q_{tn,cs}$ y q_{c1Ncs} .

Dentro de este análisis también se podría considerar la influencia de CSR^* , donde en algunos casos la demanda sísmica podría ser muy favorable en la obtención del factor de seguridad. Por ejemplo, de acuerdo con la Figura 5.24 y la Figura 5.25, para los estratos más superficiales la demanda sísmica para la metodología de Robertson (2009b) es igual o mayor que la de Boulanger e Idriss (2014, 2016). Una situación contraria sucede en los estratos más profundos donde se observa que la última metodología presenta una demanda sísmica mayor.

Aun así, cabe recordar que para la zona de interés los estratos superficiales son los que aportan más al potencial de licuación. Por lo tanto, considerando que los valores de q_{c1Ncs} son relativamente bajos, se puede explicar las diferencias entre los valores de LPI observadas entre ambas metodologías.

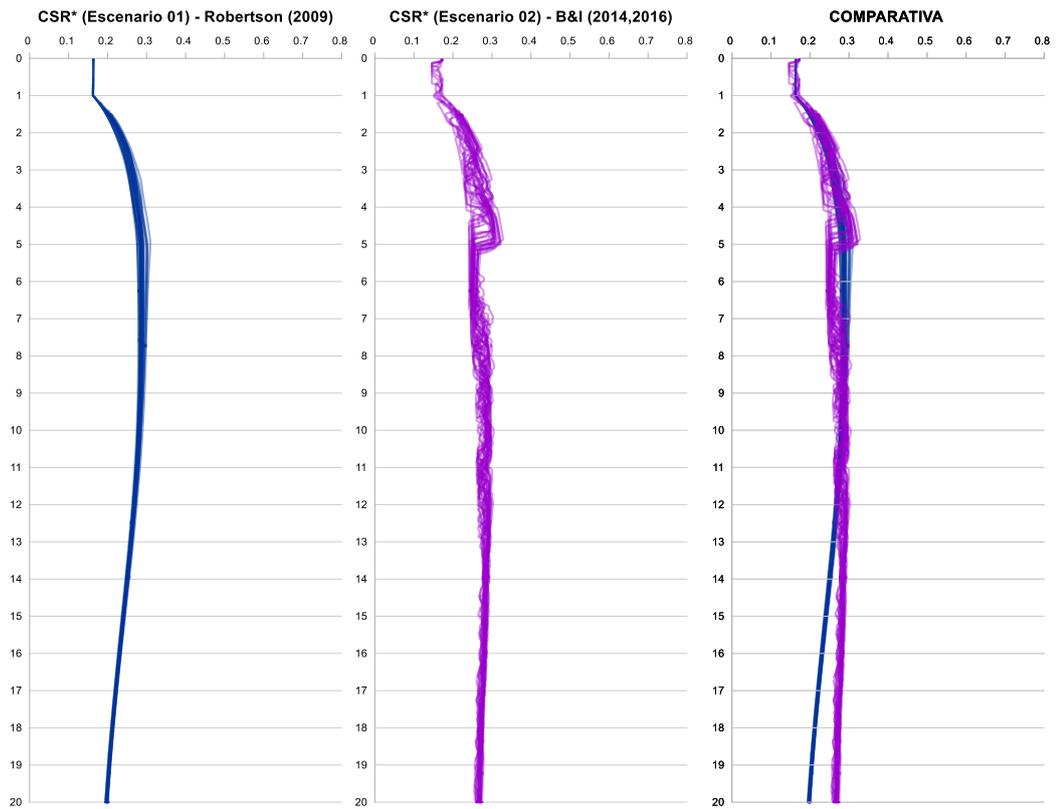


Figura 5.24: Comparativa entre valores de CSR* de todos los ensayos CPTu– Escenario 01.

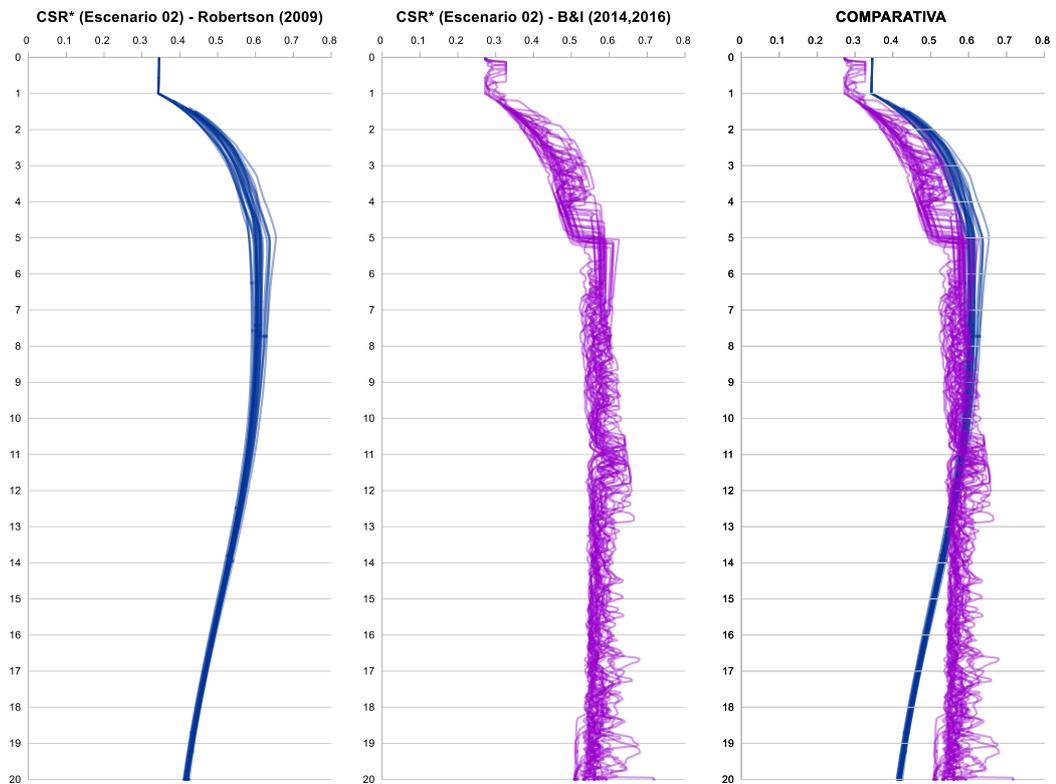


Figura 5.25: Comparativa entre valores de CSR* de todos los ensayos CPTu– Escenario 02.

Por otro lado, en la Figura 5.26 y la Figura 5.27 se presentan las curvas de licuación de cada metodología empleada ajustada a la data histórica disponible. Cabe mencionar que la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) presenta una data histórica más actualizada a comparación de Robertson (2009b). Esta última metodología está basada en metodologías semi empíricas (basada tanto en observaciones de campo como en resultados de ensayos de laboratorio). Por otro lado, el método de Boulanger e Idriss (2014, 2016) involucra una base teórica estadística a sus modelos de predicción.

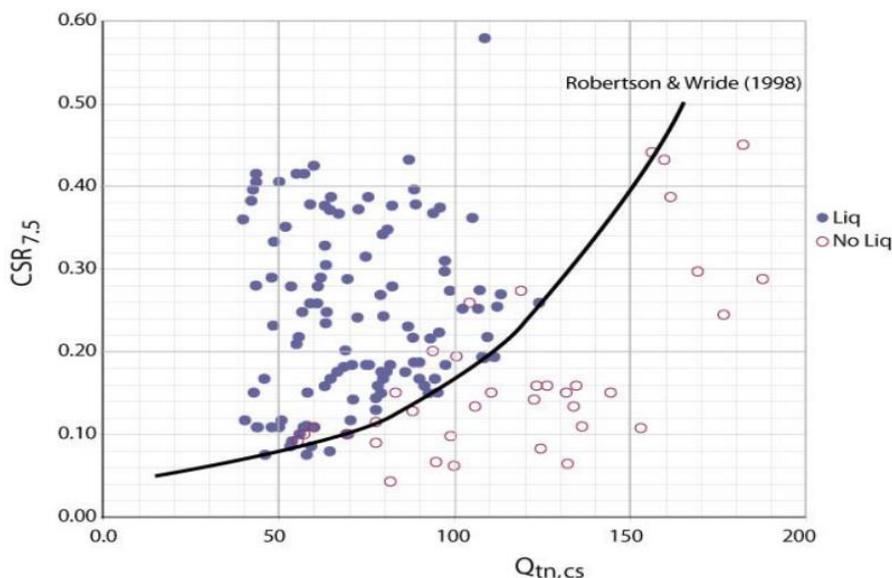


Figura 5.26: Representación gráfica curvas de licuación de la metodología presentada para la metodología de Robertson

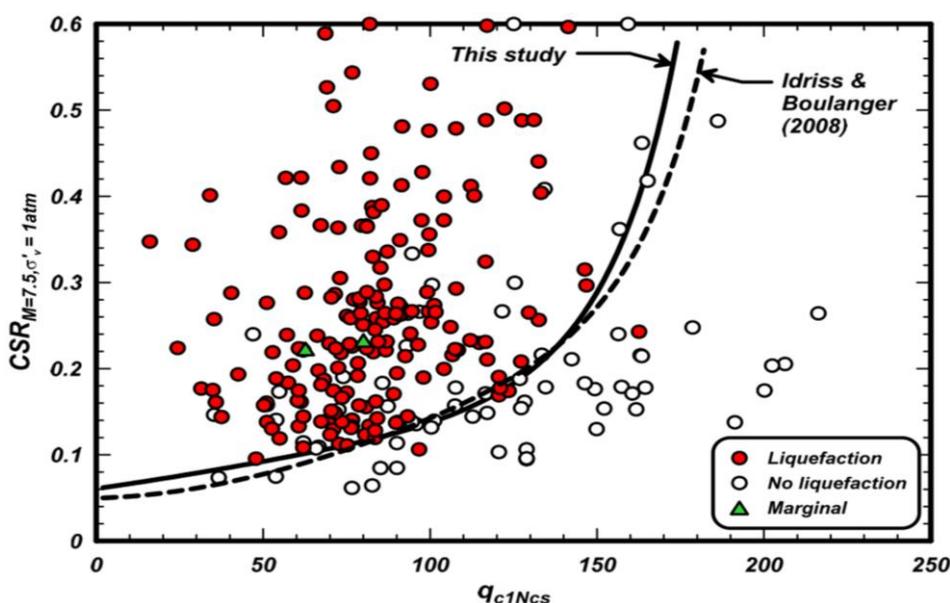


Figura 5.27: Representación gráfica curvas de licuación de la metodología presentada en la metodología de Boulanger e Idriss

Cabe aclarar que a pesar de las diferencias numéricas observadas entre los resultados de LPI de las distintas metodologías, se puede concluir que a magnitudes y aceleraciones moderadas se está teniendo un potencial de licuación relativamente variable ya que se tienen tanto potenciales de licuación bajos y altos. Sin embargo, a grandes magnitudes todos los sondajes arrojan potenciales de licuación altos a muy altos, independientemente del tipo de metodología.

Por otra parte, investigaciones desarrolladas por van Ballegooy et al. (2015) y Geyin et al. (2020) muestran que el método de Boulanger e Idriss (2014, 2016) presenta una mejor consistencia en la estimación del potencial de licuación a nivel de superficie cuando se aplica en data histórica recopilada en grandes sismos, sobre todo los ocurridos en Nueva Zelanda en la década pasada. De forma complementaria, se señala nuevamente que la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) presenta una data histórica más actualizada a comparación de Robertson (2009b).

A partir de lo mencionado y con fines de análisis, para la presente investigación se ha considerado a la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016) para ensayos CPTu como la más adecuada para la estimación del potencial de licuación en la zona de estudio.

A continuación, a partir de las metodologías seleccionadas, en el siguiente acápite se hará una comparativa entre los resultados de LPI obtenidos para cada metodología de SPT y CPTu escogida como las más adecuada.

5.3 COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE ENSAYOS SPT Y CPTu

En la Figura 5.28 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de LPI empleando ensayos CPTu y considerando la metodología de Boulanger e Idriss (2014, 2016). Por otro lado, desde la Figura 5.29 hasta la Figura 5.31 se muestra un resumen de los resultados de LPI obtenidos mediante ensayos SPT considerando las correcciones por energía y empleando la metodología Boulanger e Idriss (2014).

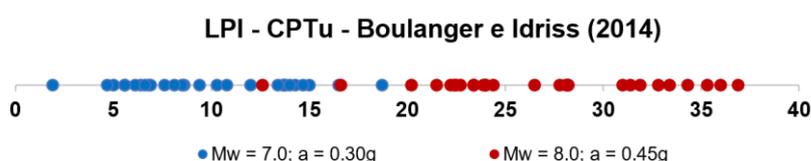


Figura 5.28: Resultados del LPI empleando ensayos CPTu



Figura 5.29: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una C_E igual a 0.50

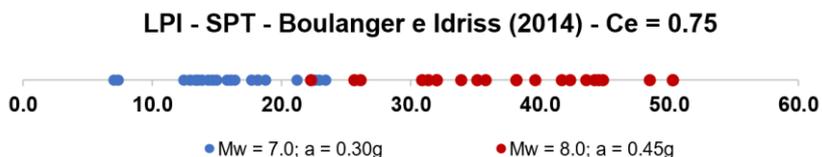


Figura 5.30: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una C_E igual a 0.75

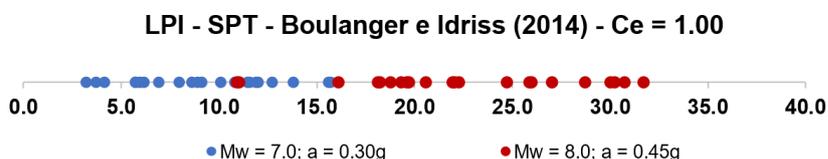


Figura 5.31: Valores de LPI empleando ensayos SPT para una C_E igual a 1.00

A partir de estas figuras, se puede observar que para la zona de estudio los resultados de CPT_u se asemejan bastante a los obtenidos para ensayos SPT considerando un valor de C_E igual a 1.00. A pesar de esta semejanza, se tiene que considerar que para este caso de estudio no se ha realizado mediciones de energía durante la ejecución de los ensayos SPT, lo cual conlleva a que haya variaciones notables en las estimaciones de LPI ya que estos dependen en gran medida del factor de corrección por energía C_E .

De forma complementaria, a pesar de ser un ensayo estandarizado los SPT están sometidos a muchas incertidumbres durante su ejecución en campo lo cual genera que se tenga una dispersión de resultados considerable cuando se trabaja en una misma zona o puntos muy cercanos (Jefferies y Davies, 1993). Debido a esto, en el estado del arte a nivel mundial y a pesar de su popularidad, el ensayo SPT no es una alternativa muy confiable para la estimación del potencial de licuación a menos que se tenga mediciones de energía de martillo.

A diferencia de lo observado con los ensayos SPT, la información de los ensayos CPT_u es bastante consistente entre sí. Casi toda la data empleada de estos ensayos presenta una dispersión mucho menor a la de los ensayos SPT. Esto ha sido también estudiado en los trabajos de Jefferies y Davies (1993). Además, la información brindada por el ensayo CPT_u es de carácter continuo y no puntual como los ensayos SPT, por lo que se puede tener una idea mucho más clara de cómo está conformada la estratigrafía del subsuelo.

El ensayo CPTu no indica el tipo de suelo o clasificación SUCS de acuerdo con lo señalado por las normativas sino nos brinda el comportamiento del suelo. Por otro lado, los ensayos SPT requieren de ensayos de laboratorio realizados a muestras de suelos alteradas extraídas del sondeo, las cuales pueden haber perdido su estructura y configuración estratigráfica natural, generando en algunos casos clasificaciones de suelo que no corresponden al comportamiento real de este.

Considerando lo mencionado, se puede concluir que para la zona de estudio el ensayo CPTu es superior al SPT para la estimación del potencial de licuación de perfiles de suelo. Esto debido a que las metodologías que emplean al ensayo SPT son muy dependientes de la calidad de la información generada, sobre todo con la medición de energía del martillo y la configuración del equipo y operarios. Además, la información que presenta el CPTu es continua y con baja dispersión entre ensayos cercanos, lo que hace que sea mucho más confiable para la estimación del potencial de licuación de un suelo empleando metodologías simplificadas, especialmente las de Boulanger e Idriss (2014, 2016).

5.4 COMENTARIOS ADICIONALES

A continuación, en el presente acápite se ha brindado algunos comentarios finales con respecto al análisis desarrollado en la presente investigación con la finalidad de tener una mayor visión y entender las limitaciones que se han observado durante el desarrollo del trabajo:

- En los acápites previos, se ha realizado una comparación entre los resultados del LPI empleando ensayos SPT y CPTu en la zona de estudio adoptada. De este análisis, se ha concluido que el ensayo CPTu es superior en la estimación del potencial de licuación de un determinado perfil de suelo. Sin embargo, el equipo CPTu requiere de implementación tecnológica que puede demandar un alto costo. Por otro lado, el SPT es un ensayo relativamente simple de implementar que ya lleva arraigado varios años en nuestro medio, sin embargo, la ejecución de mediciones de energía de martillo no es usual.
- Como se ha mostrado en la presente investigación, una mala estimación de los valores de C_E puede llevar a resultados de potencial de licuación completamente distintos y que no representan necesariamente las condiciones reales de campo. Debido a esta situación, es recomendable que se ejecute, en la medida de lo posible, mediciones de energía durante la ejecución de ensayos SPT en suelos potencialmente licuables. A modo de sugerencia, para la medición de energía se puede tomar como

referencia las recomendaciones planteadas por las normativas internacionales tales como las brindadas por la American Society For Testing and Materials (2016, 2018).

- De cualquier modo, se espera que en los próximos años se emplee con mayor medida los ensayos CPTu debido a las bondades que se han descrito en este informe.
- Los ensayos CPTu son adecuados para identificar distintos tipos de suelo. Inclusive, dependiendo del nivel de riesgo de un proyecto se puede realizar diseños geotécnicos únicamente con estos ensayos. Sin embargo, es recomendable que estos se encuentren acompañados de sondajes directos cercanos tales como calicatas, perforaciones o en todo caso una identificación adecuada de la geología de los depósitos que se estén analizando.
- Como se ha mencionado, gran parte de las metodologías de evaluación de LPI han sido desarrolladas considerando una base de datos histórica de sitios donde ha ocurrido el fenómeno de licuación. Estos sitios presentan tipos de suelos similares a los analizados en la presente investigación, sin embargo, corresponden a zonas y geologías específicas y con una sismicidad particular que no necesariamente van a ser parecidas al contexto peruano.
- Por tal motivo, sería bueno que en el Perú se desarrolle una base de datos histórica de licuación propia similar a la desarrollada por Geyin et al. (2020, 2021) para la zona de Canterbury en Nueva Zelanda o a la presentada recientemente por Montalva et al. (2022) desarrollada para Chile. Esto permitiría evaluar y poner a prueba las metodologías empleadas en esta investigación. Se podría revisar si realmente los resultados que están arrojando coinciden con los observados durante los eventos sísmicos. Además, se podría realizar una revisión de las metodologías a fin de adecuarlas al medio peruano.
- La sismicidad empleada para el análisis ha sido escogida tomando como referencia la data histórica recopilada en nuestro país y las recomendaciones de la norma E.030. Otra forma de estimar la sismicidad podría ser mediante el desarrollo de estudios de peligro sísmico determinísticos y probabilísticos para las zonas de interés. El empleo de esta metodología se encuentra fuera del alcance de esta investigación. De forma complementaria, Youd e Idriss (2001) presentan recomendaciones

para el empleo y estimación de magnitudes y aceleraciones para los análisis de licuación.

- Con respecto a la normativa peruana, cabe señalar que no se hace una distinción exacta entre el término potencial y probabilidad de licuación. Esto puede causar confusiones ya que, como se muestra en la Tabla 3.8 y la Tabla 3.9 existen diferencias con respecto al LPI. Un suelo con un LPI alto puede ser, según la norma E.050 (2018), un suelo con un potencial bajo, lo cual podría generar ideas o conceptos equivocados. Sobre todo, porque la normativa peruana permite explícitamente cimentar sobre suelos con un potencial de licuación menor de 10, lo cual podría conllevar a daños estructurales durante la ocurrencia de un sismo.

CONCLUSIONES

Con respecto a la investigación realizada, en el Perú existe una ocurrencia del fenómeno de licuación en la zona costera debido a la presencia de suelos granulares sueltos con un nivel freático elevado, además de una marcada sismicidad. Esto también se ve afectado por la presencia de suelos de un origen geológico reciente (holoceno). Esto es importante debido a que grandes ciudades del país se encuentran asentadas sobre este tipo de suelo, lo cual podría ocasionar grandes pérdidas económicas y sociales durante la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud.

En el estado de la práctica de la ingeniería en nuestro medio, la estimación del potencial de licuación de los suelos se realiza mediante el empleo de metodologías semi empíricas, las cuales han sido desarrolladas tomando como base lugares o escenarios donde se ha suscitado el fenómeno de licuación de suelos durante la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud. Estas metodologías se basan en mediciones de ensayos de campo in situ, siendo el ensayo SPT el más popular en nuestro medio. A nivel internacional, el más empleado y el más confiable viene a ser es el ensayo CPTu.

Con respecto a la estimación del potencial de licuación empleando ensayos SPT, se ha encontrado que la estimación del potencial de licuación es dependiente de la energía que trasmite el martillo durante la ejecución de dicho ensayo. Esto es representado mediante el factor de corrección por energía C_E . Se ha observado que variaciones en este valor pueden conducir a resultados muy distintos entre sí, por lo que es recomendable que se realicen mediciones de campo con la finalidad de estimar dicho valor correctamente. Además, las mediciones del ensayo se hacen a determinadas profundidades de forma puntual. Por otro lado, el ensayo CPTu puede estimar el potencial de licuación de un perfil de suelo mediante la data obtenida de sus sensores de forma.

A fin de realizar un análisis comparativo, en el presente trabajo, se ha realizado la estimación del potencial de licuación de una zona representativa ubicada en la costa norte del Perú en la que se han realizado tanto ensayos SPT como CPTu. Dicha estimación se ha desarrollado considerando las metodologías más empleadas en nuestro medio y dos (02) escenarios sísmicos de distintas intensidades. Para magnitudes moderadas, se ha observado que, en función del factor de corrección por energía adoptado, el potencial de licuación que arroja el ensayo SPT puede variar desde bajo a uno alto. Además, las dos (02)

metodologías empleadas para dicho ensayo presentan resultados prácticamente iguales. Con respecto al ensayo CPTu se ha encontrado que los resultados varían en función de la metodología aplicada, obteniéndose valores que pueden ir desde un potencial de licuación bajo a alto. Para el segundo escenario de magnitudes mayores, para sismos severos o de grandes periodos de retorno, se ha encontrado que casi todos los perfiles de suelos analizados tanto con ensayos SPT y CPTu presentan un potencial de licuación alto a muy alto.

A fin de analizar a fondo los resultados encontrados, se ha analizado las diferencias encontradas entre cada una de las metodologías empleadas. Para el análisis de los ensayos SPT se ha empleado las metodologías de Youd e Idriss (2001) y Boulanger e Idriss (2014). En ambas, a pesar de que las metodologías presentadas emplean expresiones muy distintas, se ha encontrado que los resultados son prácticamente iguales debido a que las curvas de licuación son muy semejantes. Además, que los resultados para la estimación del número de golpes del SPT corregido y normalizado ($(N_1)_{60cs}$) para ambas metodologías presentan variaciones mínimas.

Para el análisis de los ensayos CPTu se ha empleado las metodologías de Robertson (2009b) y Boulanger e Idriss (2014, 2016). Ambas mencionan que emplean para la estimación del potencial de licuación la resistencia por punta de cono normalizada para arenas limpias, sin embargo, las formulaciones y expresiones empleadas son distintas. Robertson (2009b) emplea la expresión $Q_{tn,cs}$ mientras que Boulanger e Idriss (2014, 2016) emplea q_{c1Ncs} . En todos los CPTu analizados, se ha observado que ambas expresiones presentan valores muy similares a profundidad mientras que hacia la superficie se aprecian diferencias notables. Esto, junto con las diferencias entre las curvas de licuación de cada metodología, explican las diferencias observadas durante la obtención del potencial de licuación.

Con respecto al SPT, en la presente investigación se ha concluido que, a pesar de ser un ensayo muy difundido en nuestro medio, los resultados que arroja presentan una gran dispersión propia del ensayo. Además, estas mediciones son muy dependientes del factor de corrección por energía (C_E). Variaciones en este valor pueden conducir a resultados de potencial de licuación muy variables y distintos entre sí. De los resultados presentados, se observa que cuanto menor es el C_E más susceptible a la licuación es el perfil de suelo, mientras que un valor de corrección mayor puede conllevar a que todo un estrato que antes era potencialmente licuable ya no lo sea. De acuerdo con esto, es recomendable que

se realice mediciones de energía durante la ejecución de ensayos SPT a fin de tener resultados mucho más representativos.

Considerando lo mencionado, se puede concluir que para la zona de estudio el ensayo CPTu tiene mayor confiabilidad que el SPT para la estimación del potencial de licuación de perfiles de suelo. Además, la información que presenta el CPTu es continua y con baja dispersión entre ensayos cercanos (Jefferies y Davies, 1993), lo que hace que sea mucho más confiable para la estimación del potencial de licuación de un suelo empleando metodologías simplificadas, especialmente las de Boulanger e Idriss (2014, 2016).

Por otro lado, las metodologías tienen un carácter semi-empírico que no permite analizar a detalle todo el fenómeno de licuación, el cual es bastante complejo e involucra una gran cantidad de variables que se han mencionado brevemente en el Capítulo 2 de este trabajo. En obras importantes o de gran envergadura se deben de realizar ensayos de laboratorio y campo a fin de garantizar la estabilidad y serviciabilidad de las estructuras.

Por último, cabe mencionar que las conclusiones y recomendaciones son válidas para la zona de estudio analizada en esta investigación. Sin embargo, es posible aplicar las metodologías y comentarios a otras zonas que presenten similares características.

RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado a lo largo de la presente investigación, gran parte del área costera de nuestro país es susceptible a la ocurrencia del fenómeno de licuación durante un evento sísmico. En años anteriores se ha venido desarrollando investigaciones empleando metodologías semi empíricas desarrolladas a partir de perfiles de suelos licuables registrados a nivel internacional. En el Perú no existe como tal una base de datos histórica de licuación que permita evaluar las metodologías desarrolladas considerando otros contextos. A partir de esto, es recomendable que a futuro se desarrolle una base de datos nacional donde se presenten distintos perfiles de suelos que han licuado durante la ocurrencia de grandes sismos. Eso sí, se recomienda que dichos perfiles se encuentren caracterizados mediante ensayos CPTu.

La sismicidad empleada para el análisis ha sido escogida tomando como referencia la data histórica recopilada en nuestro país y las recomendaciones de la norma E.030. Una forma más adecuada de estimar la sismicidad es mediante el desarrollo de estudios de peligro sísmico determinísticos y probabilísticos para las zonas de interés, sobre todo para el tema de la magnitud ya que no se cuenta con una referencia precisa y de fácil acceso como si se cuenta para el tema de las aceleraciones a nivel de roca o suelo muy rígido. Es recomendable que, a futuro, se realicen investigaciones que puedan desarrollar mapas temáticos que permitan una fácil estimación de las aceleraciones y magnitudes a emplear en los análisis de licuación desarrollados en el Perú.

La norma peruana E.050 debe de actualizar el acápite de licuación, dando una mayor relevancia a los ensayos CPTu tal y como se viene haciendo en otros países. Además, debe de normar la realización de mediciones de energía de martillo para los ensayos SPT. Por otro lado, debe de corregir la diferencia entre potencial y probabilidad de licuación a fin de evitar conceptos equivocados o malas prácticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Martínez, J. L. (2018). *Análisis de licuación de arenas* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/83439>
- Alva Hurtado, J. E. D., y Ortiz Salas, C. E. (2020). Updating the Occurrence of the Soil Liquefaction Phenomenon in Peru. *TECNIA*, 30(2), 6–17. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v30i2.756>
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Test Method for Energy Measurement for Dynamic Penetrometers* (D4633-16). ASTM International. <https://doi.org/10.20/D4633-16>
- American Society for Testing and Materials. (2018). *Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils* (D1586/D1586M-18e1). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1586_D1586M-18E01
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils* (D5778-20). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5778-20>
- Arnold, C., Macedo, J., Mayne, P., Vergaray, L., Zhao, Y., Dai, S., Pua, L., Miller, B., & Laningham, B. (2023). Towards Implementing SCPTu Geotechnical Design Guidelines for the State of Illinois. *Geo-Congress 2023*, 104–113. <https://doi.org/10.1061/9780784484678.011>
- Ayala Alarco, R. V. (2010). *Evaluación del potencial de licuación de suelos de la ciudad de Tambo de Mora* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/434>
- Boulanger, R. W. (2003). High Overburden Stress Effects in Liquefaction Analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1071–1082. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:12\(1071\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:12(1071))
- Boulanger, R. W., y Idriss, I. M. (2007). Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(6), 641–652. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:6\(641\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:6(641))

- Boulanger, R. W., y Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures* (Informe N° UCD/CGM-14/01). University of California.
- Boulanger, R. W., y Idriss, I. M. (2016). CPT-Based Liquefaction Triggering Procedure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(2), 04015065. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001388](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001388)
- Bray, J. D., y Sancio, R. B. (2006). Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(9), 1165–1177. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:9\(1165\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1165))
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen, R. E., y Moss, R. E. S. (2004). Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314–1340. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1314\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1314))
- Clayton, C. R. I. (1990). SPT energy transmission: Theory, measurement and significance. *Ground Engineering*, 23(10), 33–42.
- Eslami, A., Moshfeghi, S., MolaAbasi, H., & Eslami, M. M. (2020). CPT equipment, performance, and records. En *Piezococone and Cone Penetration Test (CPTu and CPT) Applications in Foundation Engineering* (pp. 55–80). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102766-0.00003-1>
- Geyin, M., Maurer, B., Bradley, B., Green, R., & van Ballegooy, S. (2020). *CPT-Based Liquefaction Case Histories Resulting from the 2010-2016 Canterbury, New Zealand, Earthquakes: A Curated Digital Dataset (Version 2)* [Conjunto de datos]. Designsafe-CI. <https://doi.org/10.17603/DS2-TYGH-HT91>
- Geyin, M., Maurer, B. W., Bradley, B. A., Green, R. A., & Van Ballegooy, S. (2021). CPT-based liquefaction case histories compiled from three earthquakes in Canterbury, New Zealand. *Earthquake Spectra*, 37(4), 2920–2945. <https://doi.org/10.1177/8755293021996367>
- Green, R. A., Cubrinovski, M., Cox, B., Wood, C., Wotherspoon, L., Bradley, B., & Maurer, B. (2014). Select Liquefaction Case Histories from the 2010–2011

- Canterbury Earthquake Sequence. *Earthquake Spectra*, 30(1), 131–153.
<https://doi.org/10.1193/030713EQS066M>
- Harder, L. F., y Boulanger, R. W. (1997). Application of K-Sigma and K-Alpha correction factors. *Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*, 167-190.
- Hynes, M. E., y Olsen, R. S. (1999). Influence of confining stress on liquefaction resistance. En *Physics and Mechanics of Soil Liquefaction* (1era ed., pp. 145–151).
- Idriss, I. M. (1999, 10 de enero). An Update to the Seed-Idriss Simplified Procedure for Evaluating Liquefaction Potential [notas de presentación]. *Proceedings of TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction*, Washington DC, USA. <https://www.ce.memphis.edu/7137/PDFs/IDRISS.pdf>
- Idriss, I. M., y Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI).
- Iwasaki, T., Arakawa, T., y Tokida, K.-I. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49–58.
[https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5)
- Iwasaki, T., Tokida, K.-I., y Tatsuoka, F. (1981). Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure. *1st International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 12, 209–214.
<https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/01icrageesd/session02/12>
- Iwasaki, T., Tokida, K.-I., Tatsuoka, F., y Yasuda, S. (1978). A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Site in Japan. *Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application*, 885–896.
- Jaime, A. (1978). *Comportamiento de arenas bajo carga estática y cíclica* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/84513>

- Jefferies, M., y Davies, M. (1993). Use of CPTu to Estimate Equivalent SPT N_{60} . *Geotechnical Testing Journal*, 16(4), 458–468. <https://doi.org/10.1520/GTJ10286J>
- Kayen, R. E., Mitchell, J. K., Seed, R. B., Lodge, A., Nishio, S., y Coutinho, R. (1992). Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data. *Proceedings from the Fourth Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, 177–204.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering* (1era ed.). Prentice Hall.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design* (Informe Técnico EL-6800). Electric Power Research Institute. <https://www.epri.com/research/products/EL-6800>
- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden Correction Factors for SPT in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3), 373–377. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:3\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373))
- Maurer, B. W., Green, R. A., Cubrinovski, M., y Bradley, B. A. (2015). Assessment of CPT-based methods for liquefaction evaluation in a liquefaction potential index framework. *Géotechnique*, 65(5), 328–336. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP.15.P.007>
- Mayne, P. W., Christopher, B. R., y DeJong, J. (2001). *Manual on Subsurface Investigations* (Manual FHWA NHI-01-031; p. 394). Federal Highway Administration.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú. (2018). *Resolución Ministerial 406-2018-VIVIENDA del 30 de noviembre del 2018. Por la cual modifican la Norma Técnica E.050 Suelos y Cimentaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones*. <https://www.gob.pe/es/l/222983>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de la República del Perú. (2019). *Resolución Ministerial 043-2019-VIVIENDA del 11 de febrero del 2019. Por la cual modifican la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones*. <https://www.gob.pe/es/l/259580>

- Montalva, G., Ruz, F., Escribano, D., Bastías, N., Espinoza, D., y Paredes, F. (2022). Chilean liquefaction case history database. *Earthquake Spectra*, 38(3), 2260–2280. <https://doi.org/10.1177/87552930211070313>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences* (p. 280). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23474>
- Ovando-Shelley, E. (1992). Bounding surfaces and steady state for sands. En E. Ovando-Shelley, G. Auvinet Guichard, W. I. Pariagua Zavala, & J. J. Díaz Monges (Eds.), *Volumen Raul J. Marsal* (pp. 193–204). Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Ovando-Shelley, E., y Segovia Pacheco, J. A. (1996). *Licuação en arenas*. TGC Geotecnia.
- Robertson, P. K. (2009a). Interpretation of cone penetration tests—A unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- Robertson, P. K. (2009b). Performance based earthquake design using the CPT. En T. Kokusho, Y. Tsukamoto, & M. Yoshimine (Eds.), *Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/NOE0415556149.ch1>
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: an update. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. <https://cpt-robertson.com/PublicationsPDF/2-56%20RobSBT.pdf>
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—An update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Robertson, P. K., y Cabal, K. L. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering* [Guía]. Gregg Drilling & Testing, Inc. <https://www.greggdrilling.com/wp-content/uploads/2017/07/CPT-Guide-6th-Edition-2016.pdf>

- Robertson, P. K., y Wride, C. (Fear). (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442–459. <https://doi.org/10.1139/t98-017>
- Roncal, M. (2017). *Determinación del peligro sísmico en el territorio nacional y elaboración de aplicativo web* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/12214>
- Schneider, J. A., y Mayne, P. W. (1999). *Soil Liquefaction Response in Mid-America Evaluated by Seismic Piezocone Tests* (Informe Técnico MAE-GT-3A). Mid-America Earthquake Center.
- Schofield, A., y Wroth, P. (1968). *Critical state soil mechanics* (1era ed.). McGraw-Hill.
- Seed, H. B. (1983). Earthquake-resistant design of earth dams. *Seismic Design of Embankments and Caverns*, 41–64.
- Seed, H. B., y Idriss, I. M. (1970). *A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential* (Informe Técnico Informe N° EERC 70-9; p. 46). Earthquake Engineering Research Center. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB198009.xhtml>
- Seed, H. B., y Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>
- Seed, H. B., y Idriss, I. M. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., y Chung, R. M. (1985). Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425–1445. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:12\(1425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:12(1425))
- Silgado, E. (1978). *Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974)* (Boletín 3; Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, p. 130). Instituto de Geología y Minería. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/251>
- Srithar, S. T., y Ervin, M. C. (2001). Evaluation of the efficiency of an automatic SPT hammer. *15th International Conference on Soil Mechanics and*

- Foundation Engineering*, 511–514.
https://www.issmge.org/uploads/publications/1/30/2001_01_0118.pdf
- Terzaghi, K., Peck, R. B., y Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3a ed.). Wiley.
- van Ballegooy, S., Lacrosse, V., Russell, J., Simpson, J., y Malan, P. (2015, del 22 al 25 de febrero). Comparison of CPT-based simplified liquefaction assessment methodologies based on the Canterbury dataset [conferencia]. *12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Wellington, Nueva Zelanda.
- Vargas Moreno, C. O., Flores López, F. A., y Ortiz Hermsillo, R. E. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad a la licuación de arenas* (1era ed.). Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
- Youd, T. L., y Idriss, I. M. (1997). *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils* (Informe Técnico NCEER-97-0022). <https://www.eng.buffalo.edu/mceer-reports/97/97-0022.pdf>
- Youd, T. L., & 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.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))
- Youd, T. L., & Perkins, D. M. (1978). Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(4), 433–446. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000612>

ANEXOS

Anexo A: Análisis del potencial de licuación empleando ensayos SPT	103
Anexo B: Análisis del potencial de licuación empleando ensayos CPTu.....	148
Anexo C: Plano de distribución de sondajes	177

ANEXO A

Análisis del potencial de licuación empleando ensayos SPT

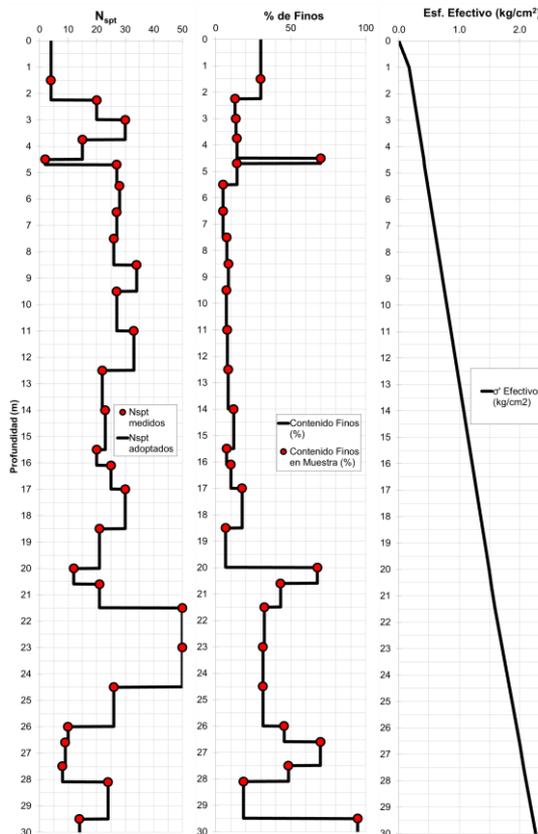
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-01

PARÁMETROS DE ENTRADA:

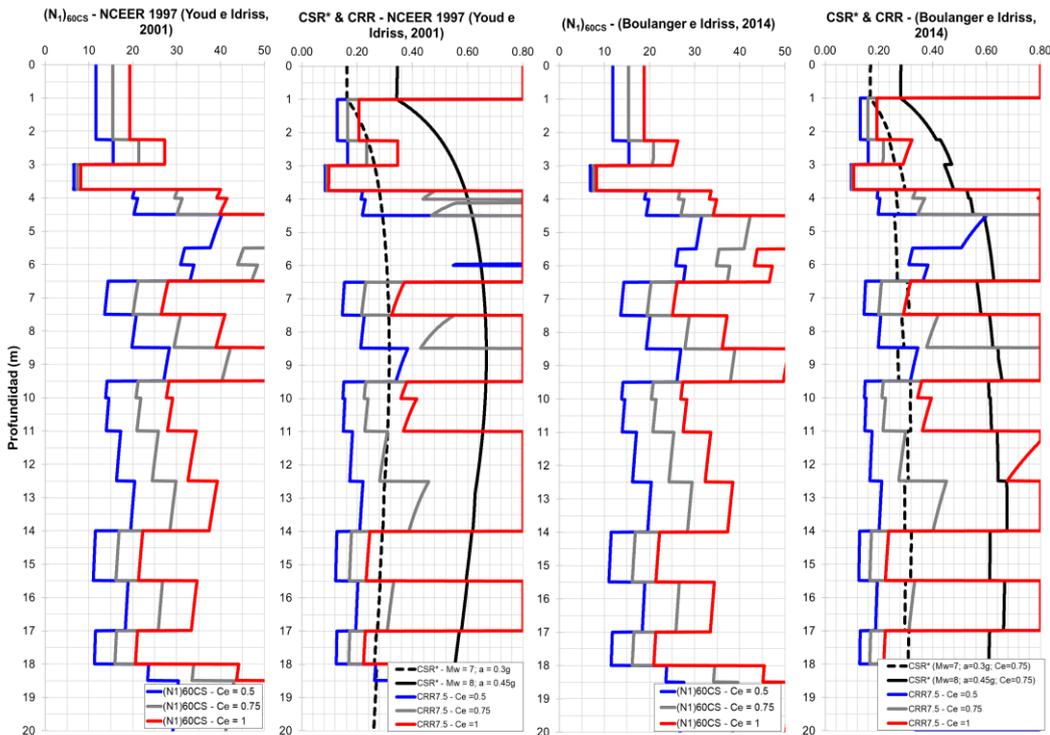
Sondaje	: SPT-01
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

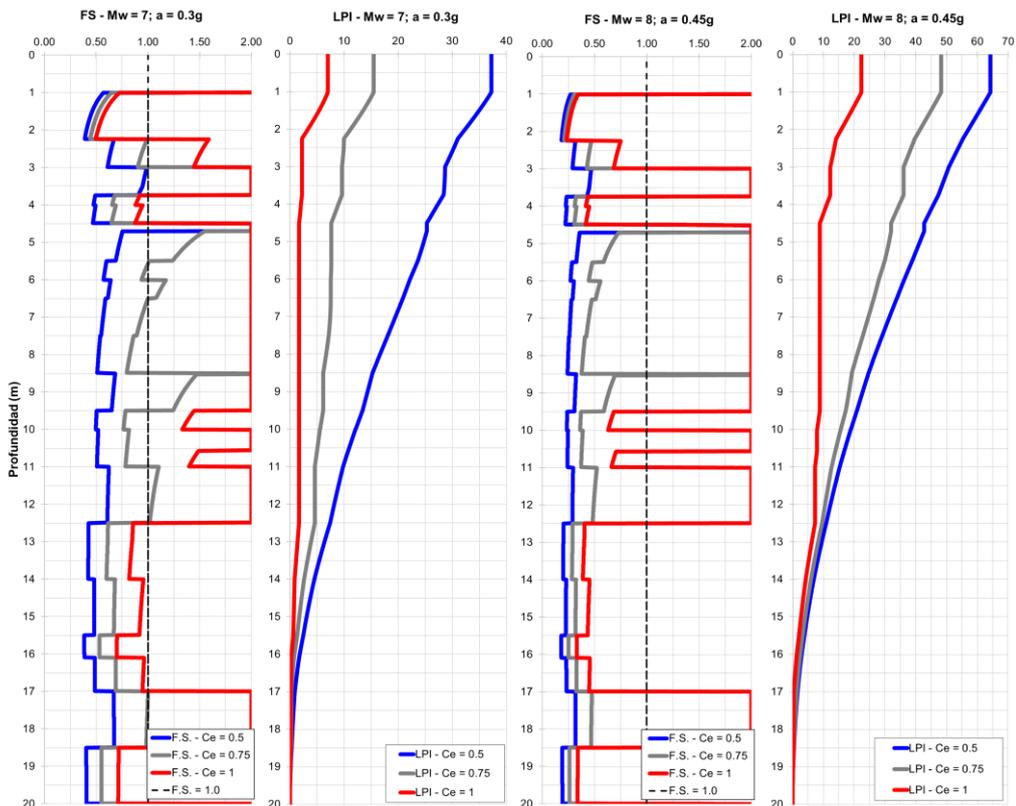
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	37.2	Efectos severos
		0.75	15.5	Efectos severos
		1	7.0	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	40.5	Efectos severos
		0.75	18.3	Efectos severos
		1	8.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	64.2	Efectos severos
		0.75	48.3	Efectos severos
		1	22.4	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	61.5	Efectos severos
		0.75	48.5	Efectos severos
		1	25.9	Efectos severos



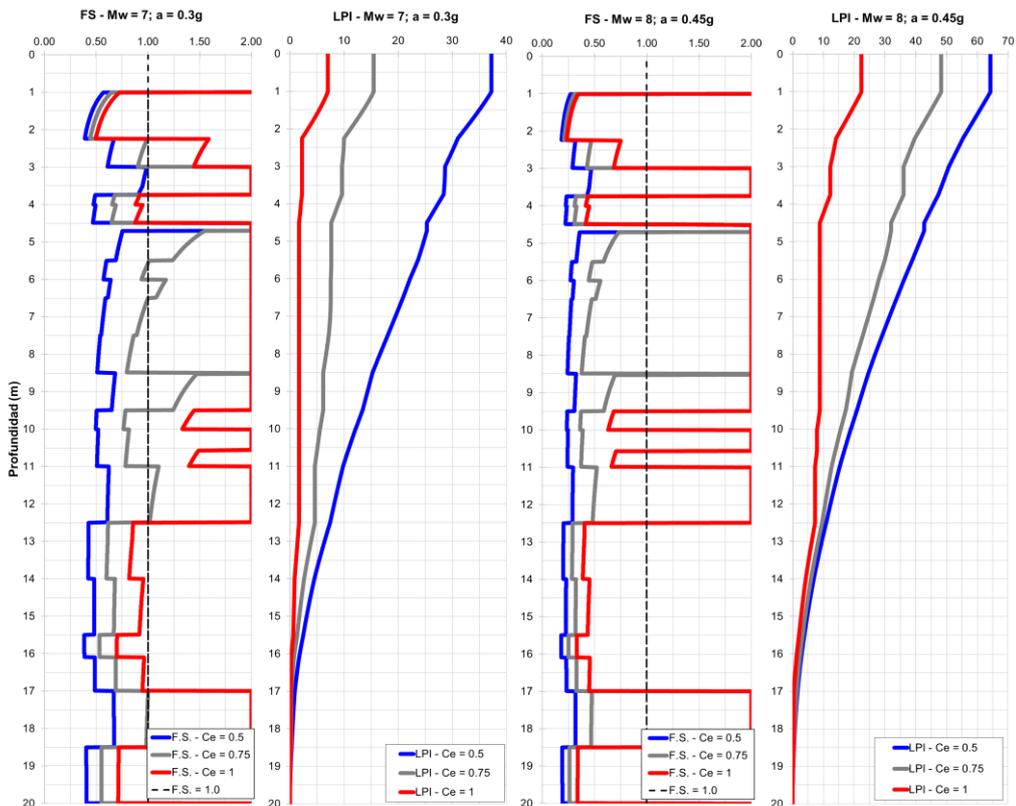
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



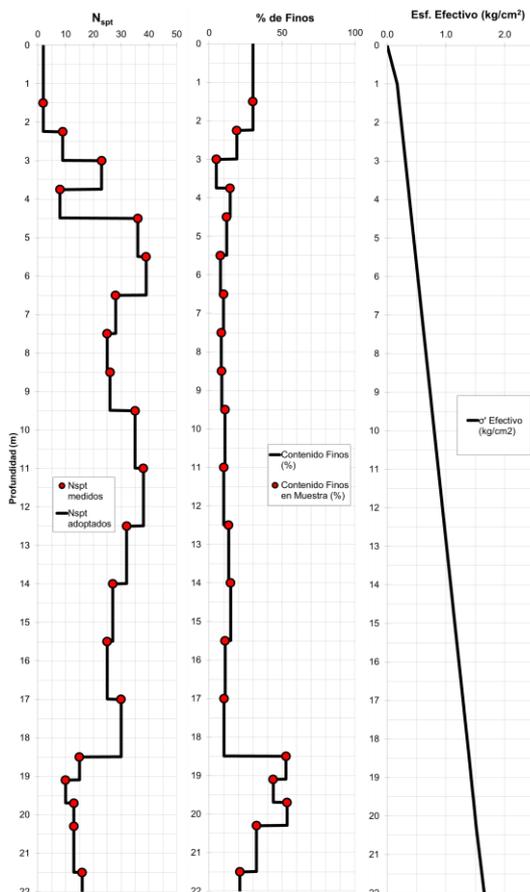
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-02

PARÁMETROS DE ENTRADA:

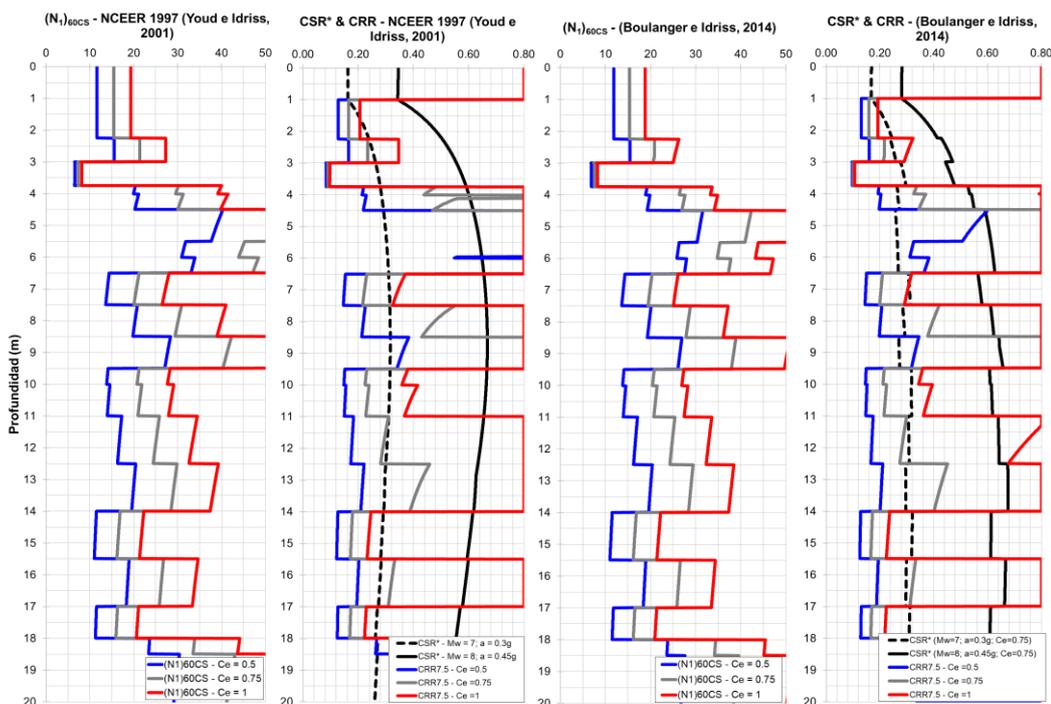
Sondaje	: SPT-02
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

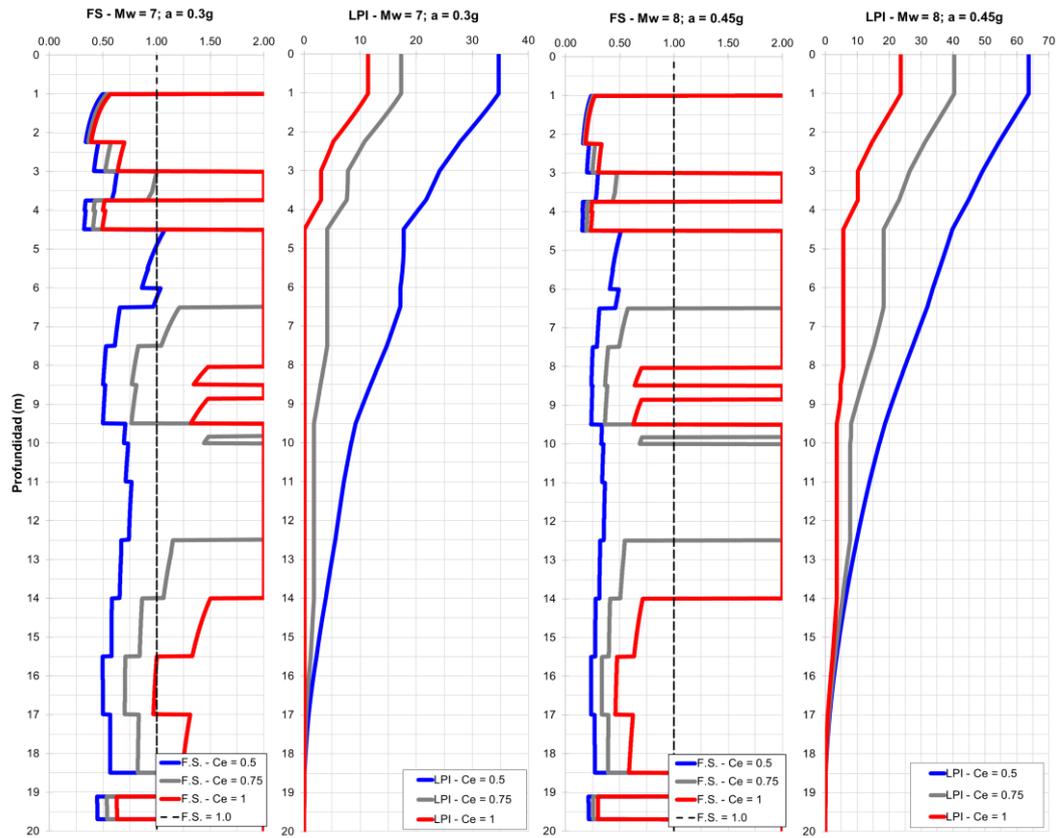
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	34.7	Efectos severos
		0.75	17.3	Efectos severos
		1	11.4	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	37.7	Efectos severos
		0.75	18.9	Efectos severos
		1	11.5	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	63.7	Efectos severos
		0.75	40.4	Efectos severos
		1	23.6	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	61.0	Efectos severos
		0.75	42.3	Efectos severos
		1	26.0	Efectos severos



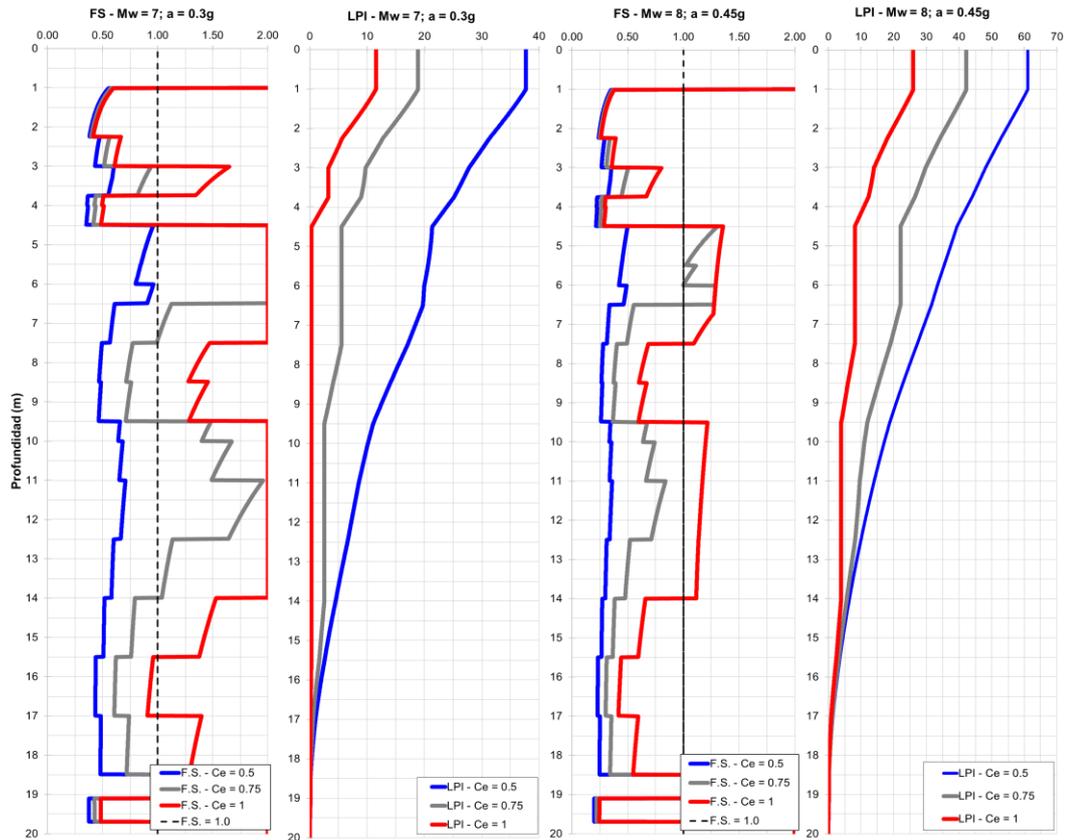
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



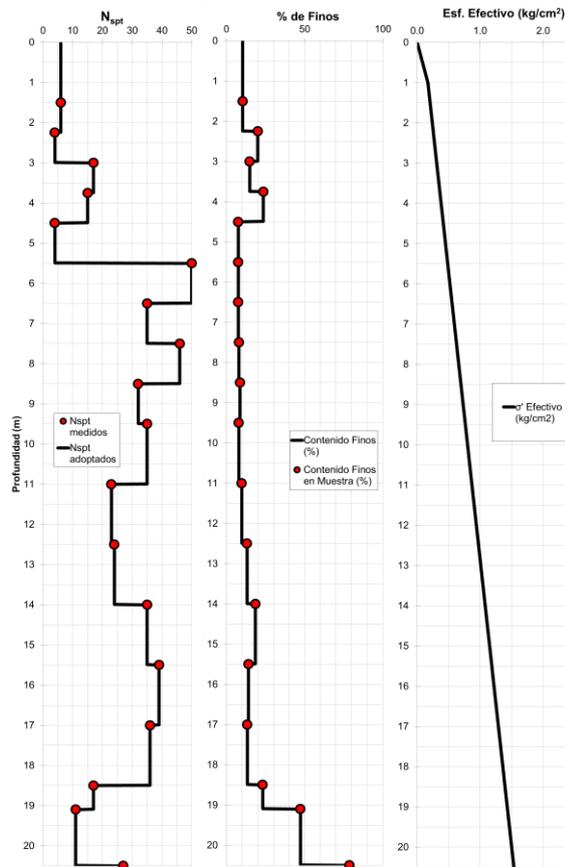
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-03

PARÁMETROS DE ENTRADA:

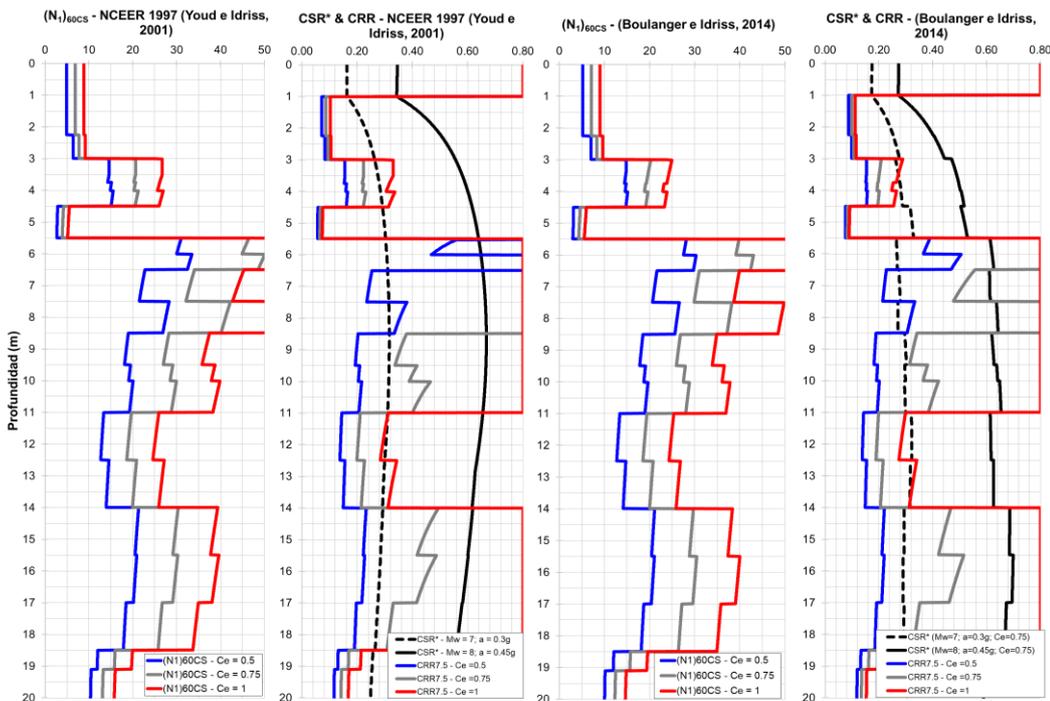
Sondaje	: SPT-03
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

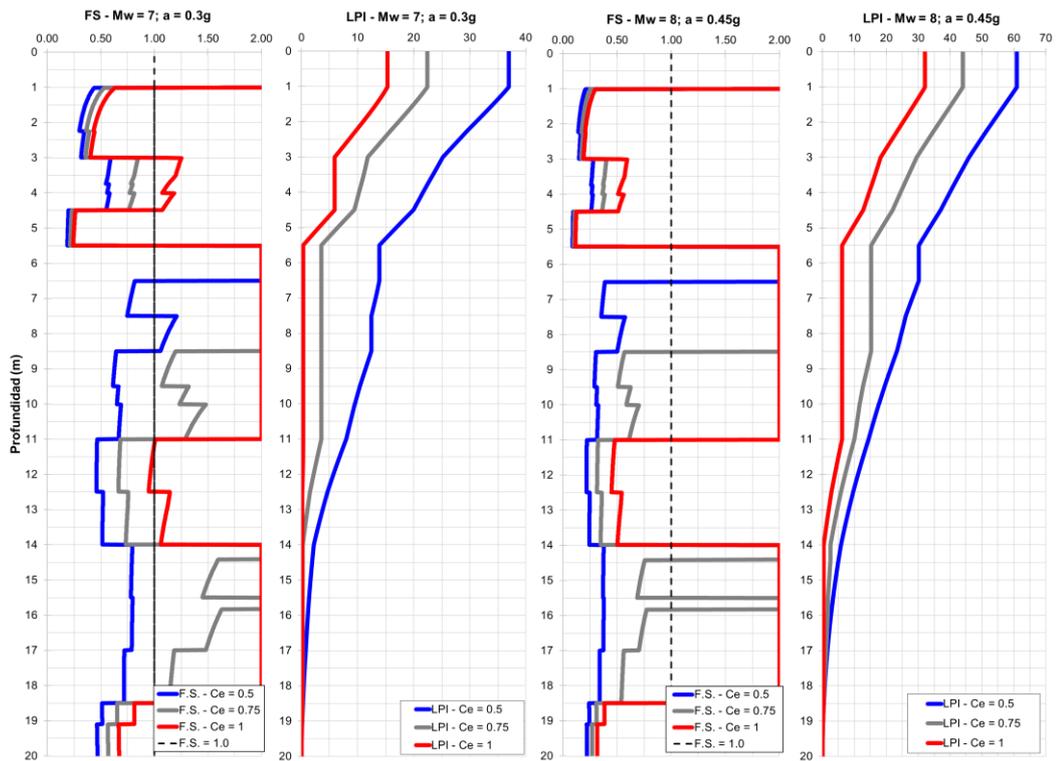
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	37.0	Efectos severos
		0.75	22.4	Efectos severos
		1	15.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	38.6	Efectos severos
		0.75	23.4	Efectos severos
		1	15.6	Efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	60.9	Efectos severos
		0.75	44.0	Efectos severos
		1	32.1	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	60.3	Efectos severos
		0.75	44.2	Efectos severos
		1	30.8	Efectos severos



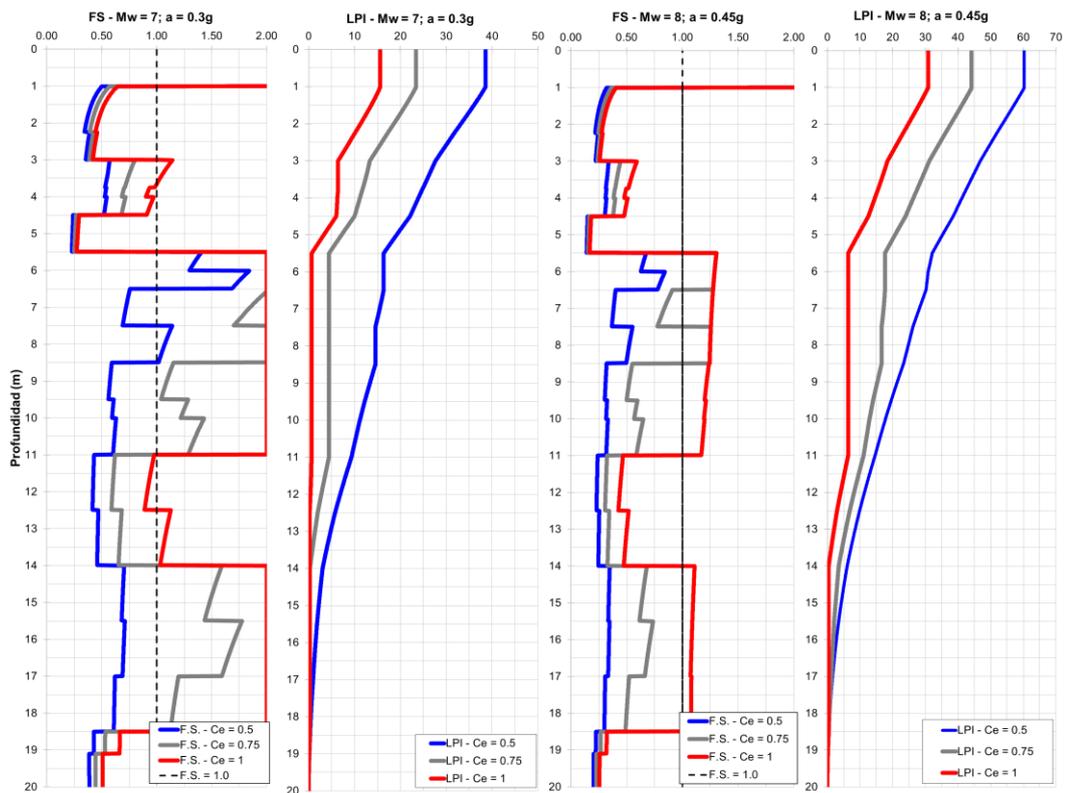
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



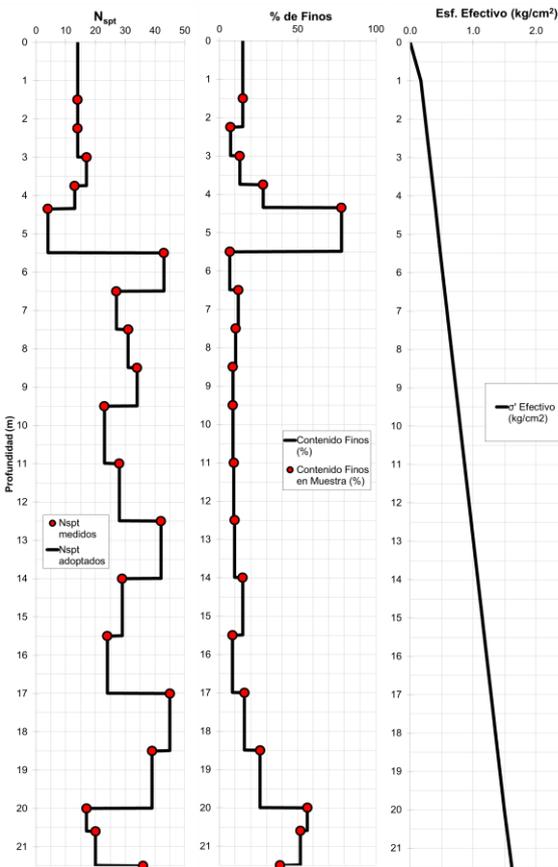
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-04

PARÁMETROS DE ENTRADA:

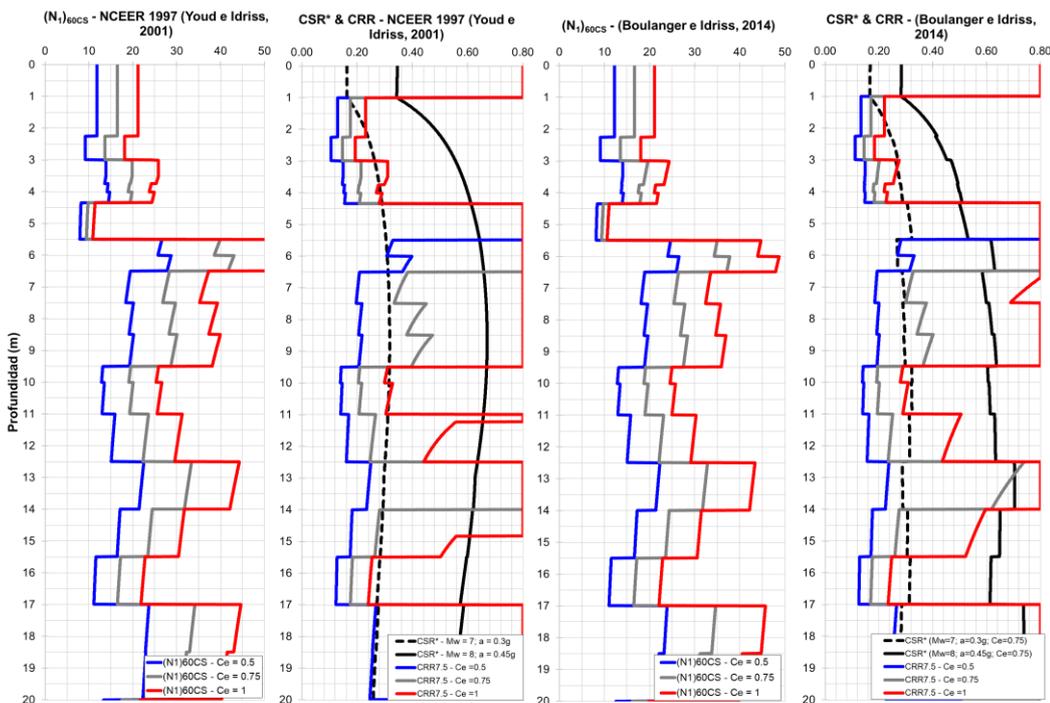
Sondaje	: SPT-04
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

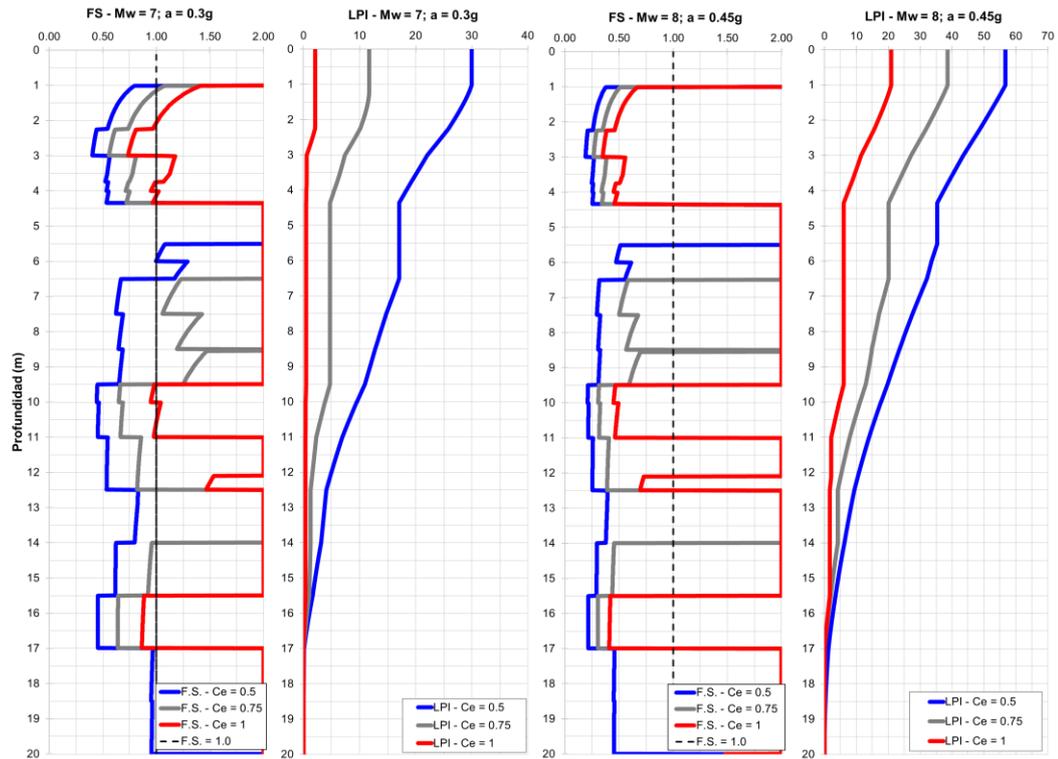
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	30.0	Efectos severos
		0.8	11.7	Probables efectos severos
		1	2.1	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	33.0	Efectos severos
		0.8	14.4	Probables efectos severos
		1	3.8	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	56.7	Efectos severos
		0.8	38.6	Efectos severos
		1	20.9	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	54.6	Efectos severos
		0.8	38.2	Efectos severos
		1	22.3	Efectos severos



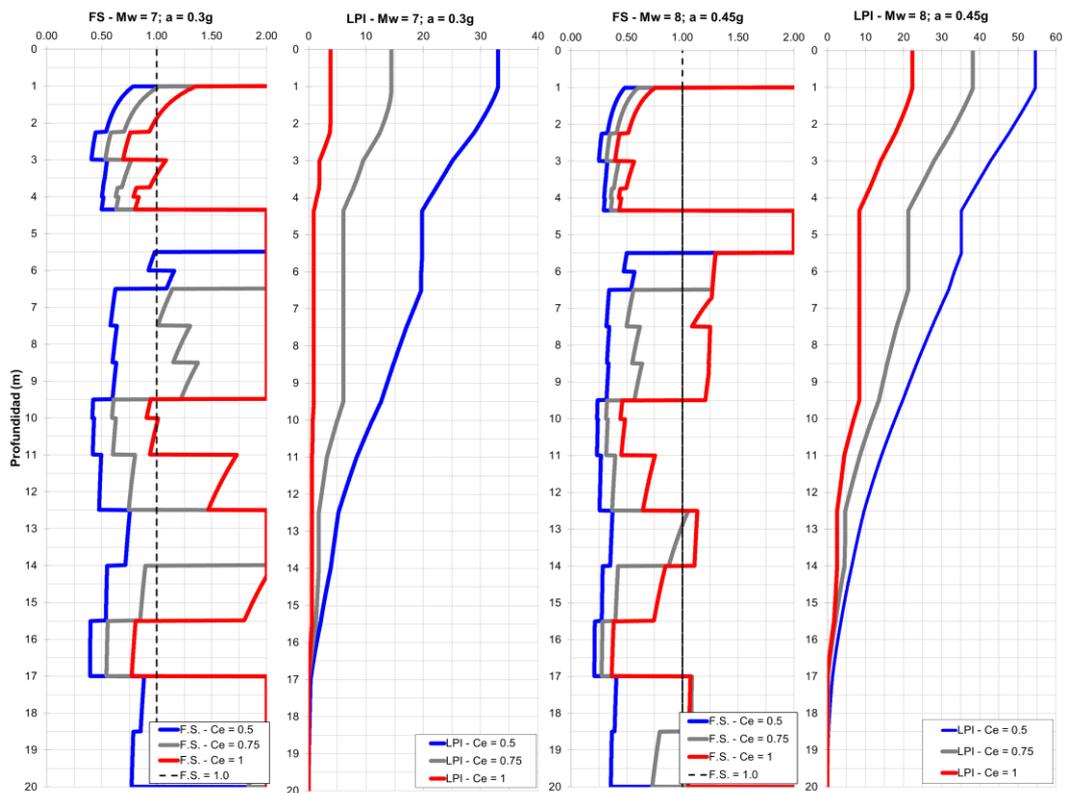
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



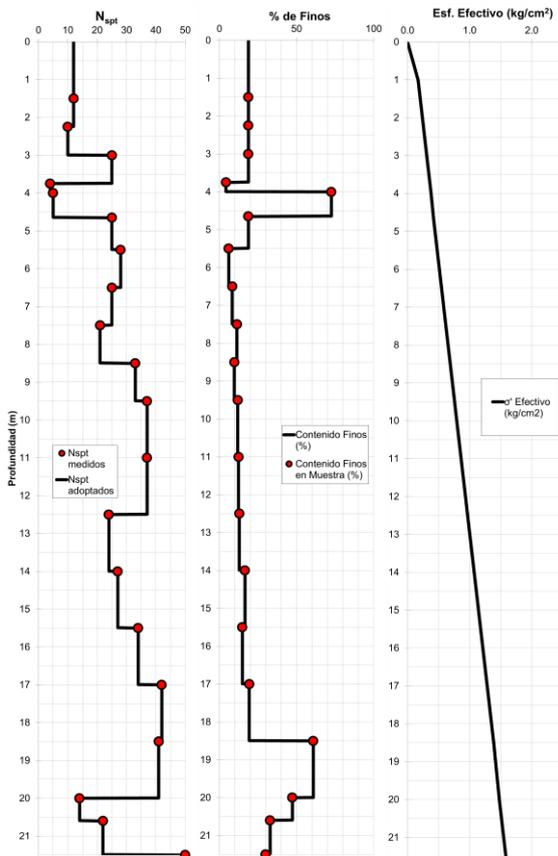
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-05

PARÁMETROS DE ENTRADA:

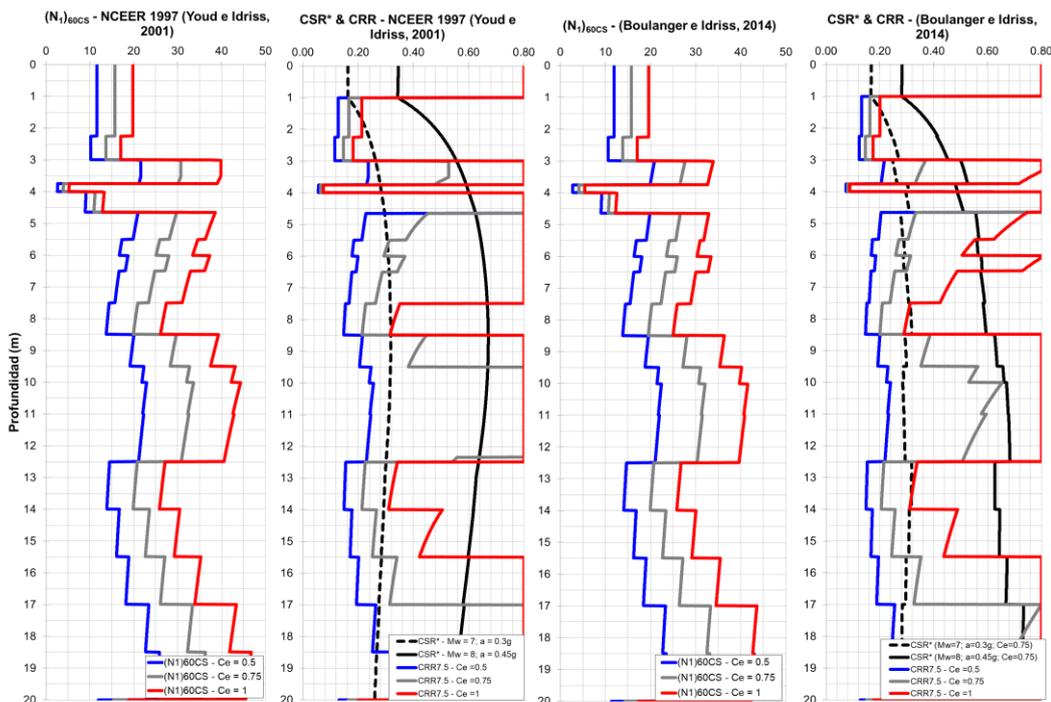
Sondaje	: SPT-05
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

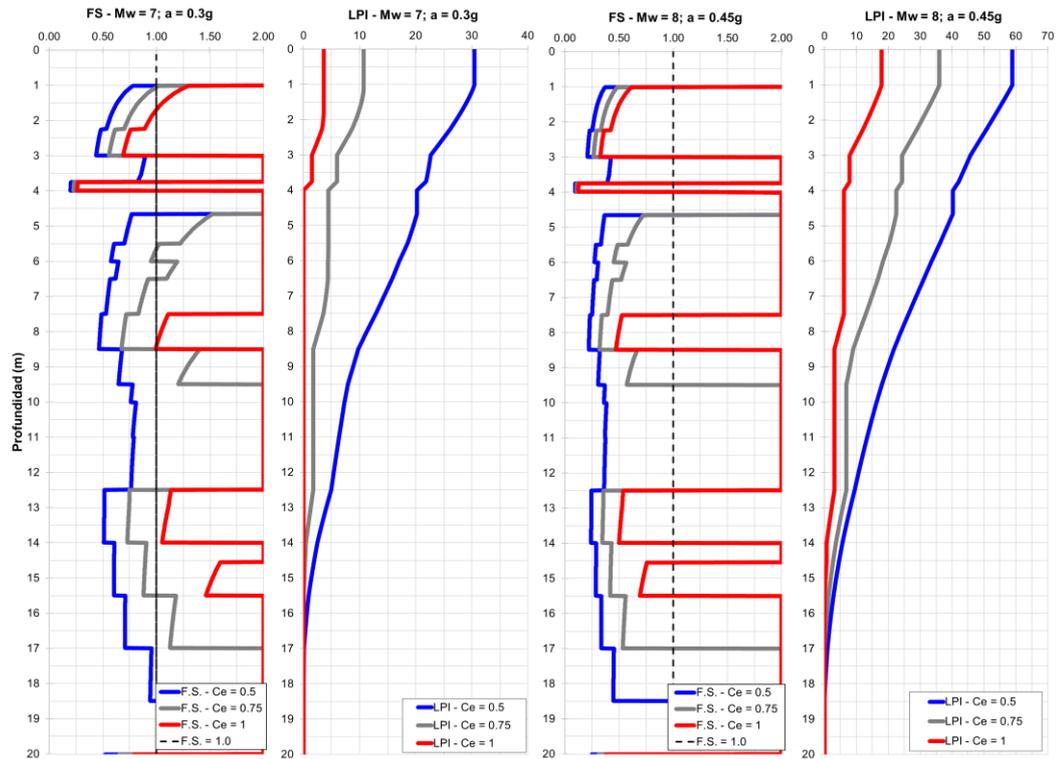
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	30.5	Efectos severos
		0.8	10.8	Probables efectos severos
		1	3.6	No hay efectos de licuación
	Boulangier e Idriss (2014)	0.5	34.1	Efectos severos
		0.8	12.9	Probables efectos severos
		1	4.2	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	58.9	Efectos severos
		0.8	36.0	Efectos severos
		1	17.9	Efectos severos
	Boulangier e Idriss (2014)	0.5	56.6	Efectos severos
		0.8	39.6	Efectos severos
		1	19.6	Efectos severos



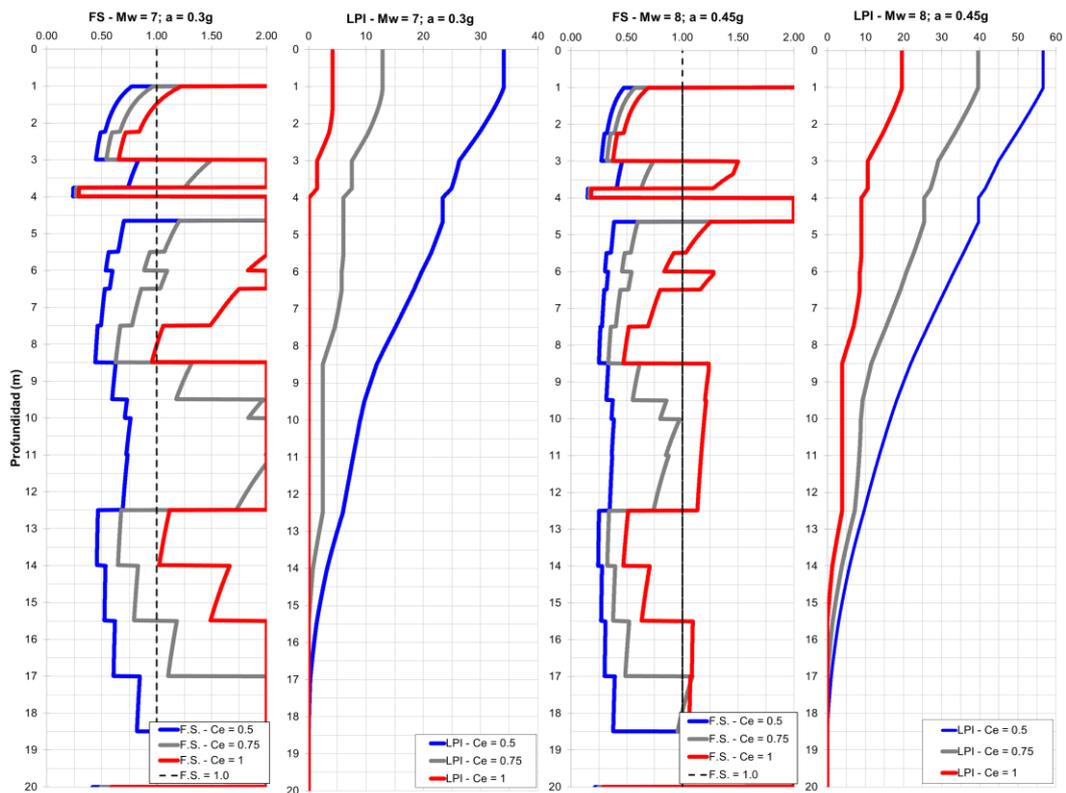
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



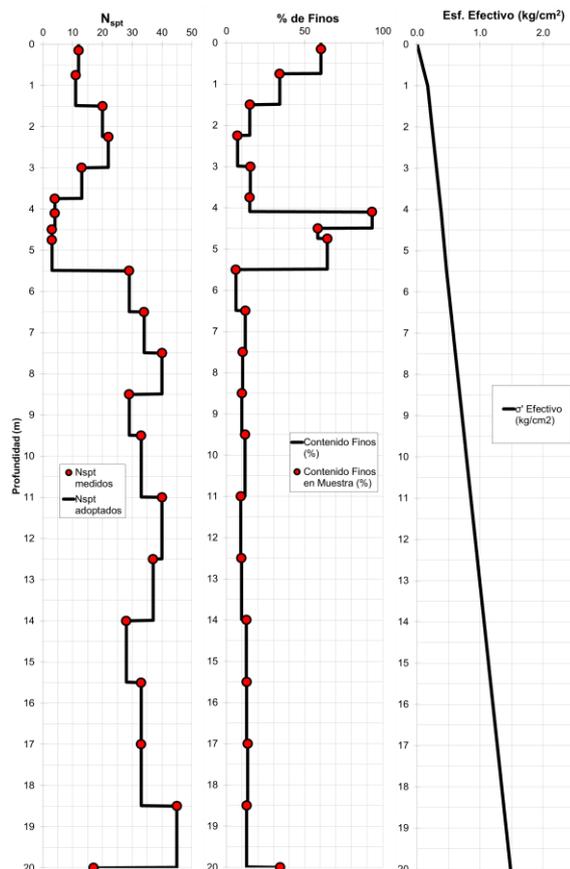
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-06

PARÁMETROS DE ENTRADA:

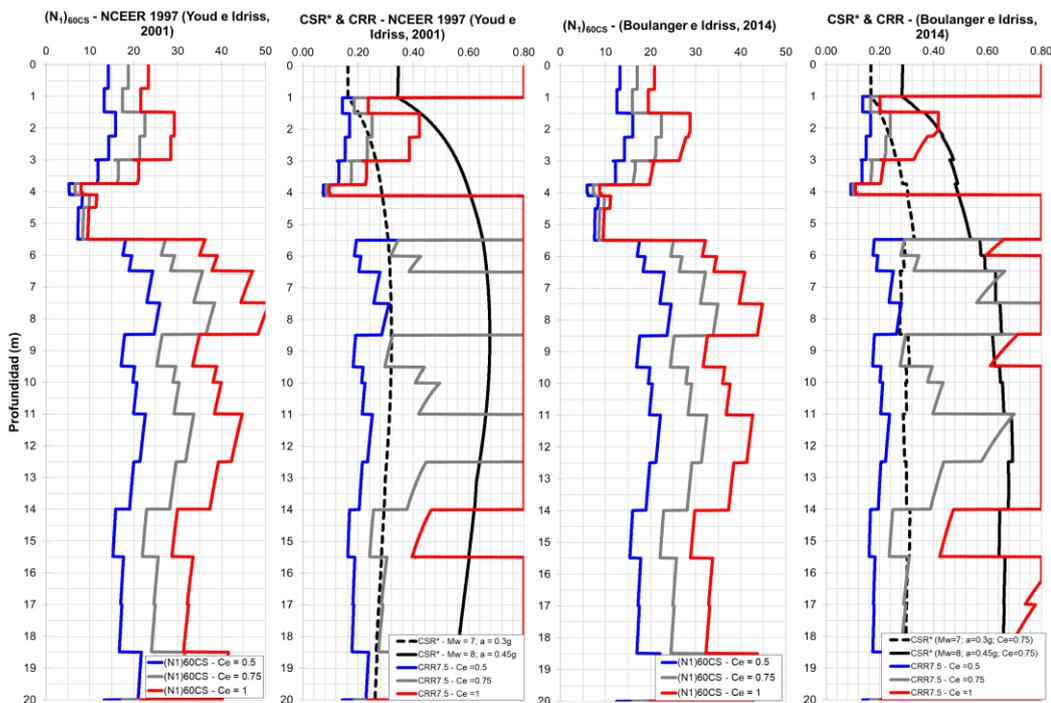
Sondaje	: SPT-06
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

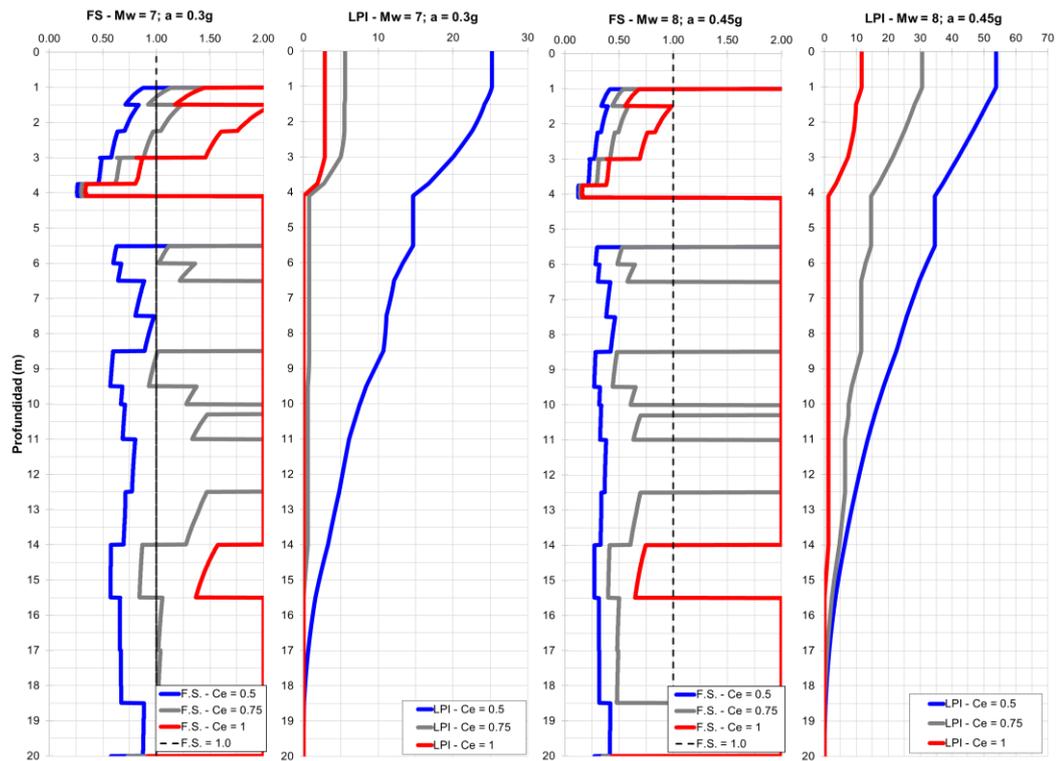
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	25.2	Efectos severos
		0.8	5.6	Probables efectos severos
		1	2.9	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	29.0	Efectos severos
		0.8	7.1	Probables efectos severos
		1	3.2	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	53.8	Efectos severos
		0.8	30.6	Efectos severos
		1	11.6	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	52.0	Efectos severos
		0.8	31.4	Efectos severos
		1	11.0	Probables efectos severos



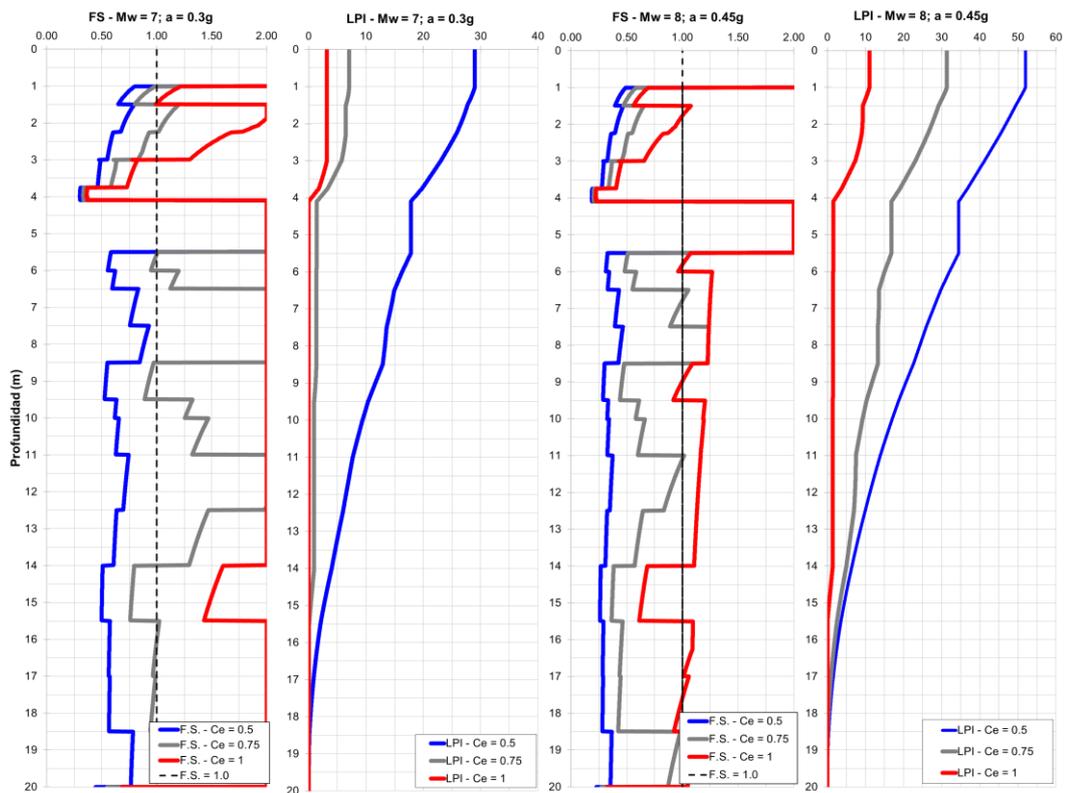
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDR ISS, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDR ISS (2014):



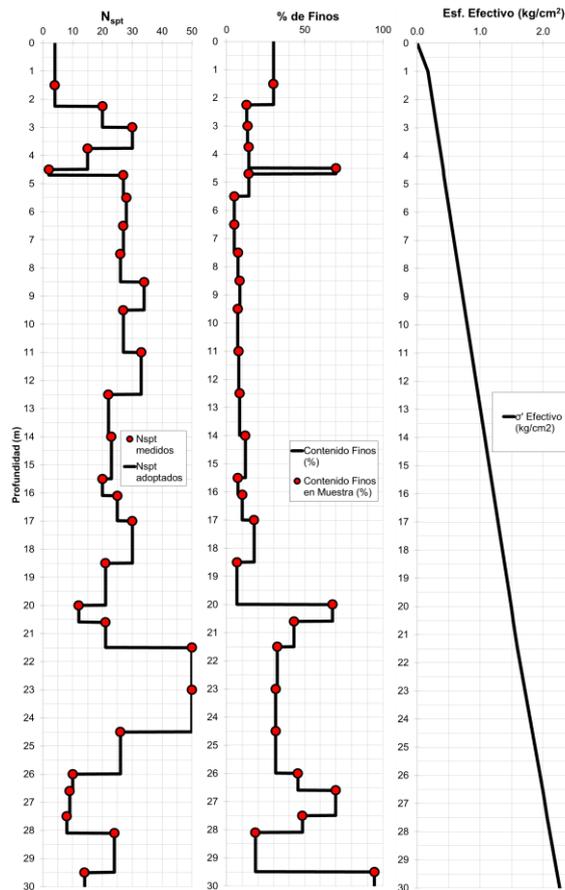
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-07

PARÁMETROS DE ENTRADA:

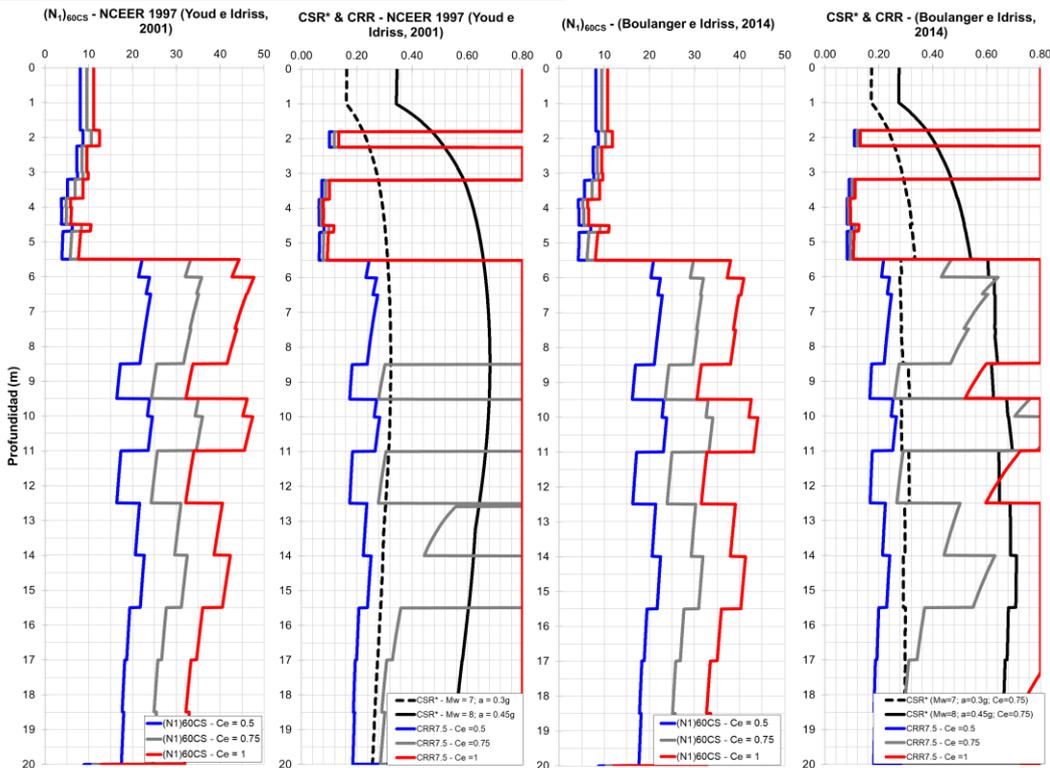
Sondaje	: SPT-07
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

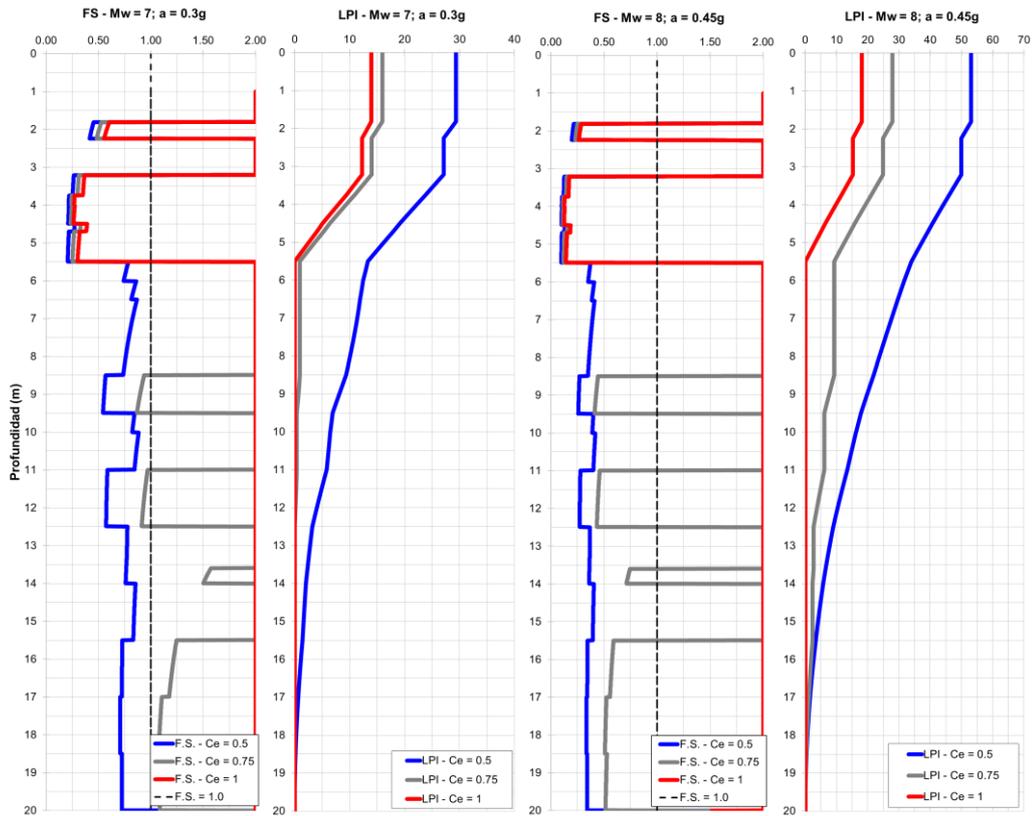
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	29.4	Efectos severos
		0.8	16.0	Efectos severos
		1	14.0	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	32.0	Efectos severos
		0.8	16.1	Efectos severos
		1	13.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	53.1	Efectos severos
		0.8	27.9	Efectos severos
		1	18.1	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	51.9	Efectos severos
		0.8	32.0	Efectos severos
		1	18.2	Efectos severos



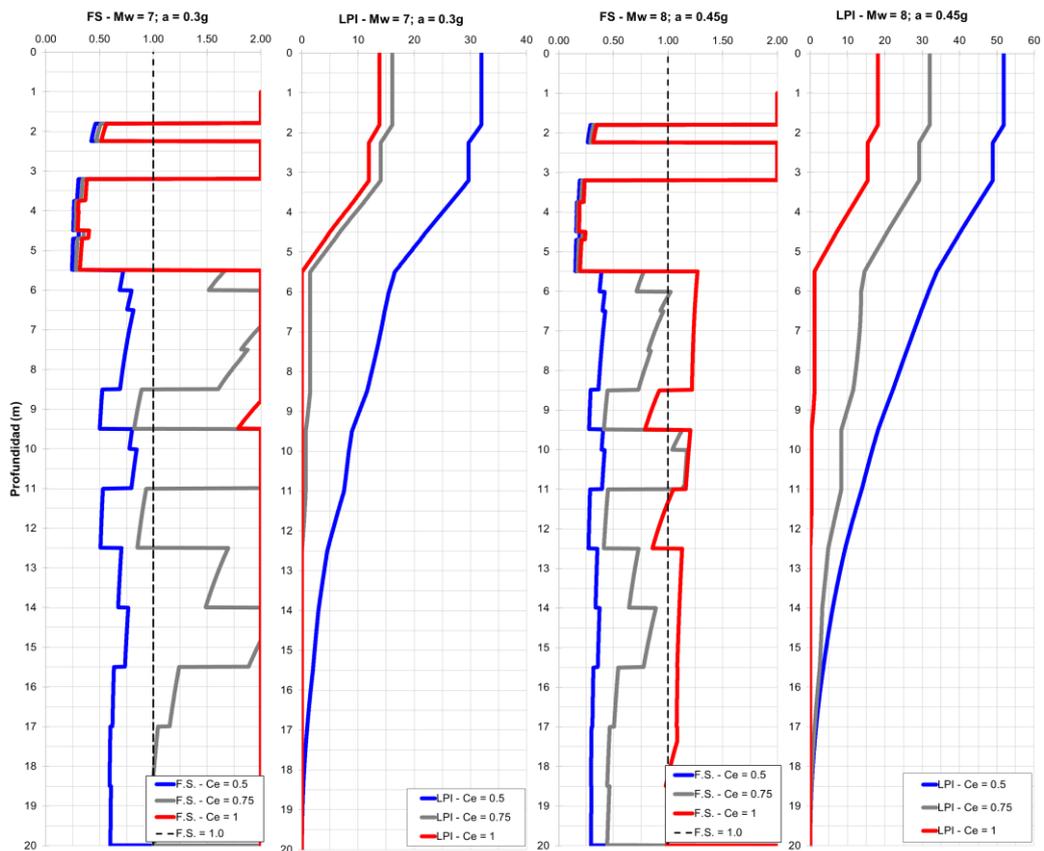
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



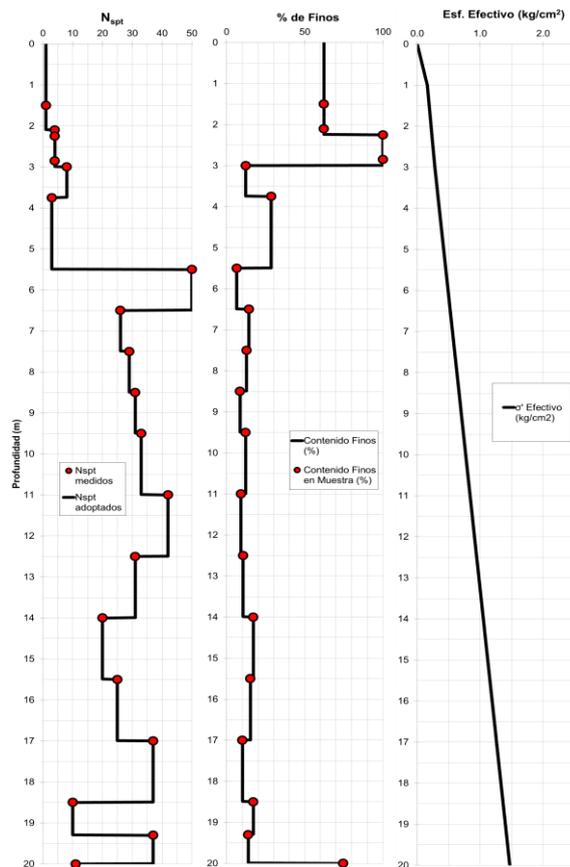
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-08

PARÁMETROS DE ENTRADA:

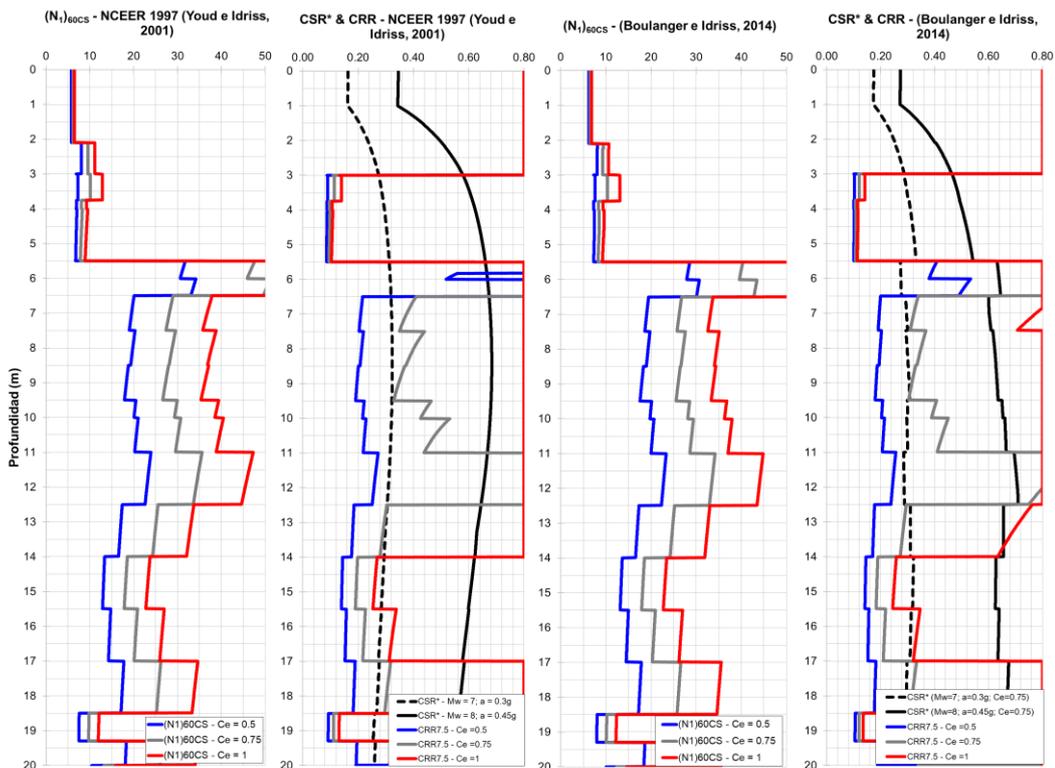
Sondaje	: SPT-07
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

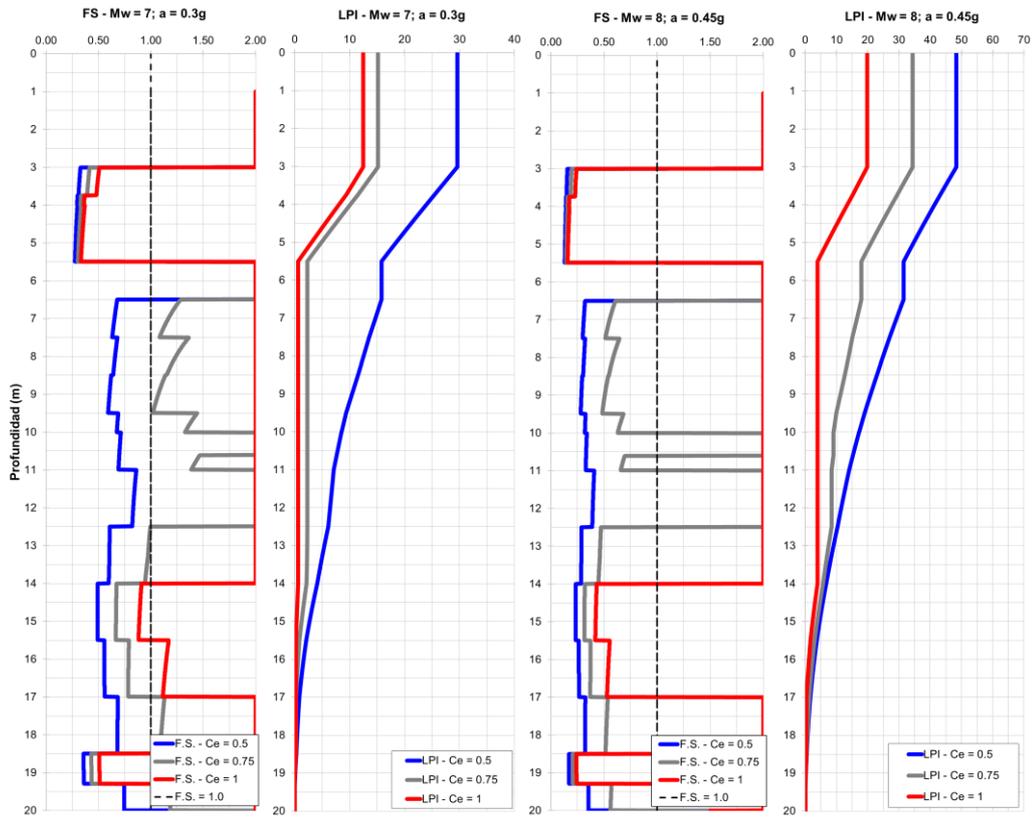
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	29.6	Efectos severos
		0.8	15.1	Efectos severos
		1	12.5	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	31.7	Efectos severos
		0.8	15.8	Efectos severos
		1	12.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	48.3	Efectos severos
		0.8	34.3	Efectos severos
		1	19.8	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	48.8	Efectos severos
		0.8	35.2	Efectos severos
		1	19.3	Efectos severos



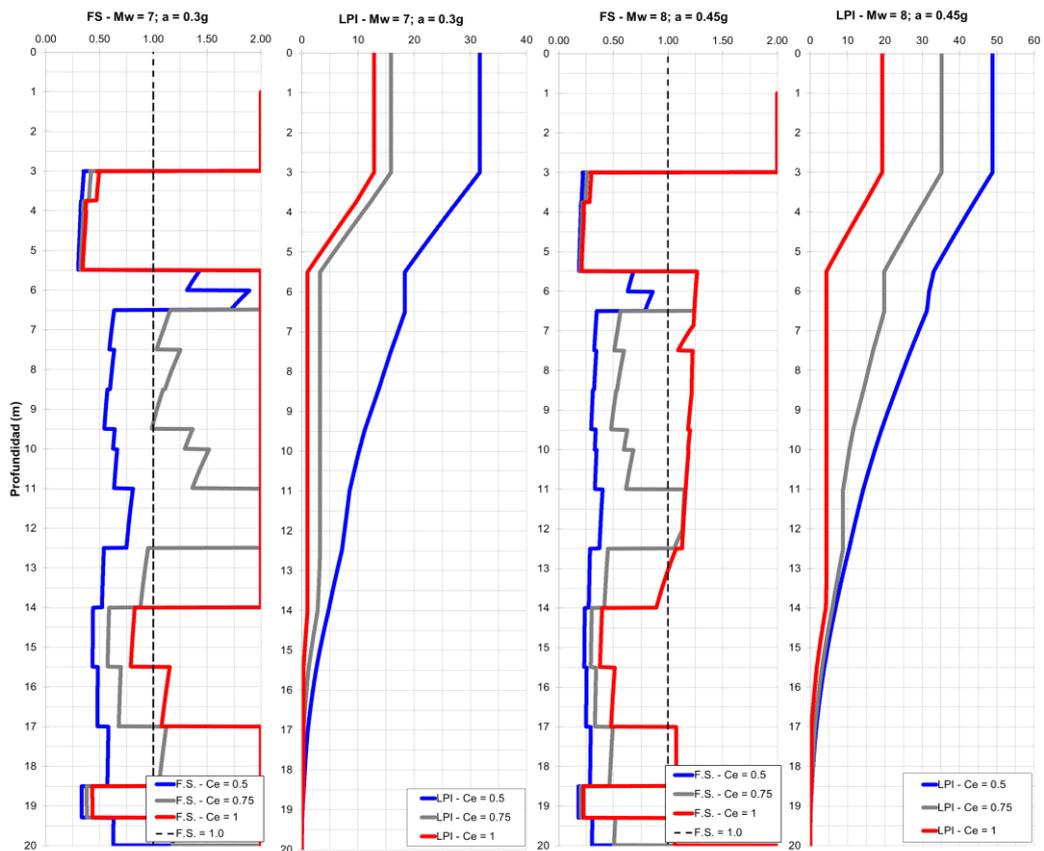
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



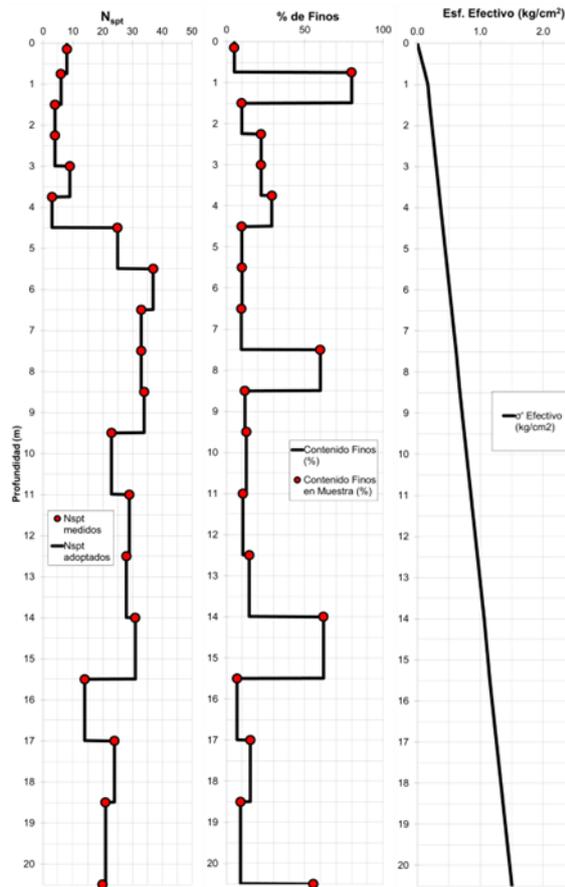
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-09

PARÁMETROS DE ENTRADA:

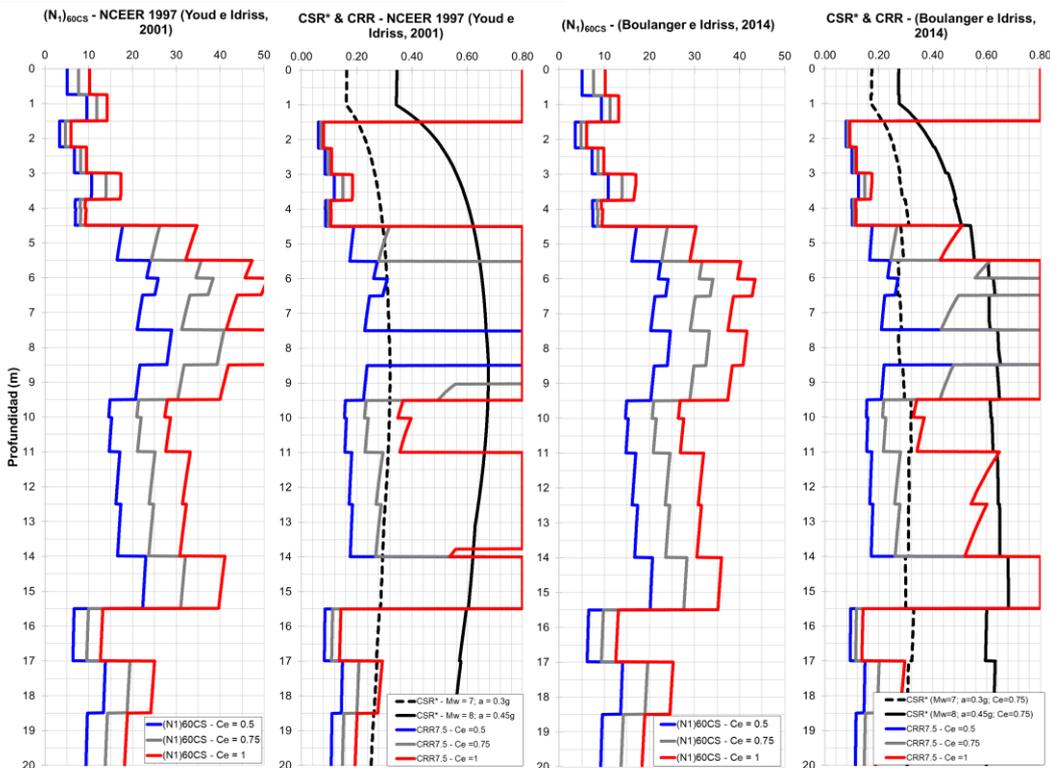
Sondaje	: SPT-09
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

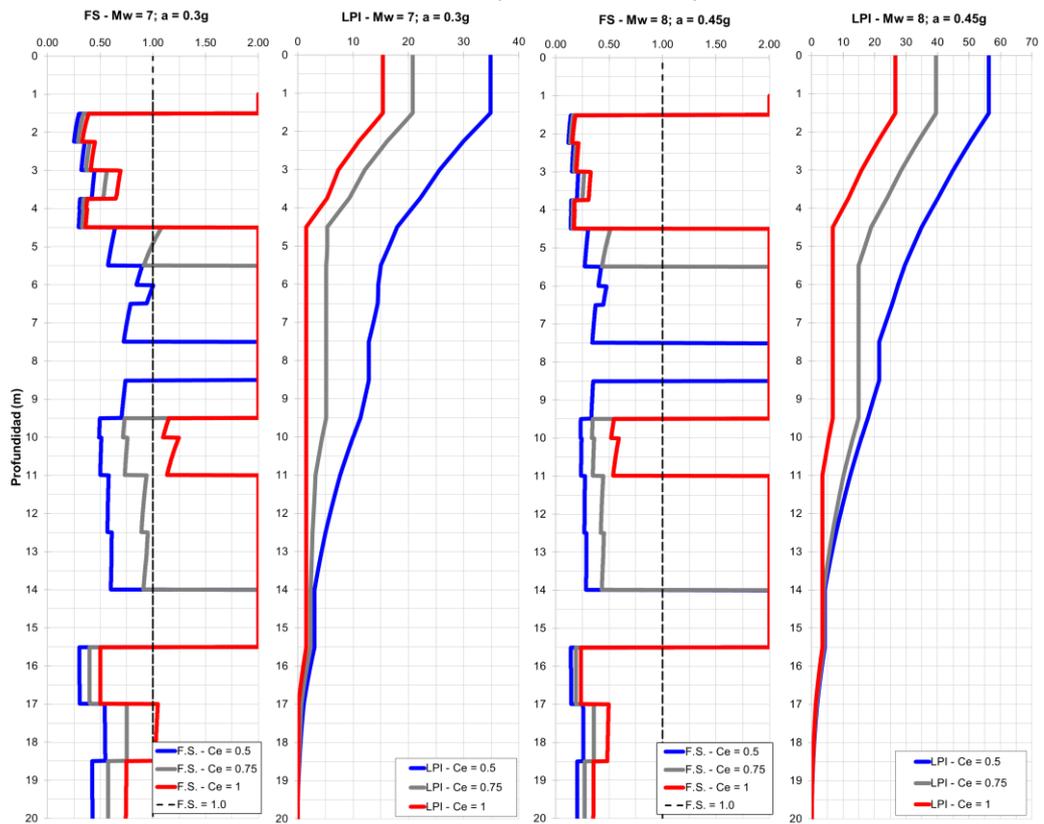
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	34.9	Efectos severos
		0.8	20.8	Efectos severos
		1	15.4	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	36.7	Efectos severos
		0.8	22.4	Efectos severos
		1	15.7	Efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	56.3	Efectos severos
		0.8	39.6	Efectos severos
		1	26.6	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	53.9	Efectos severos
		0.8	41.6	Efectos severos
		1	28.7	Efectos severos



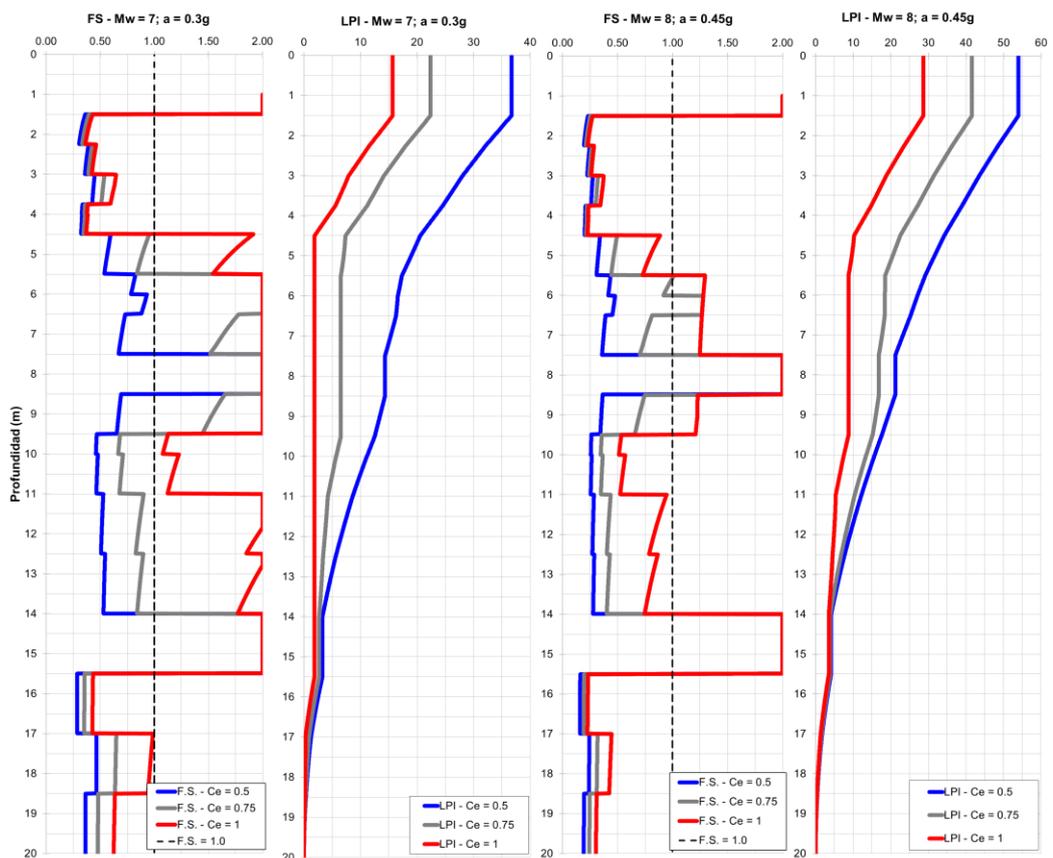
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



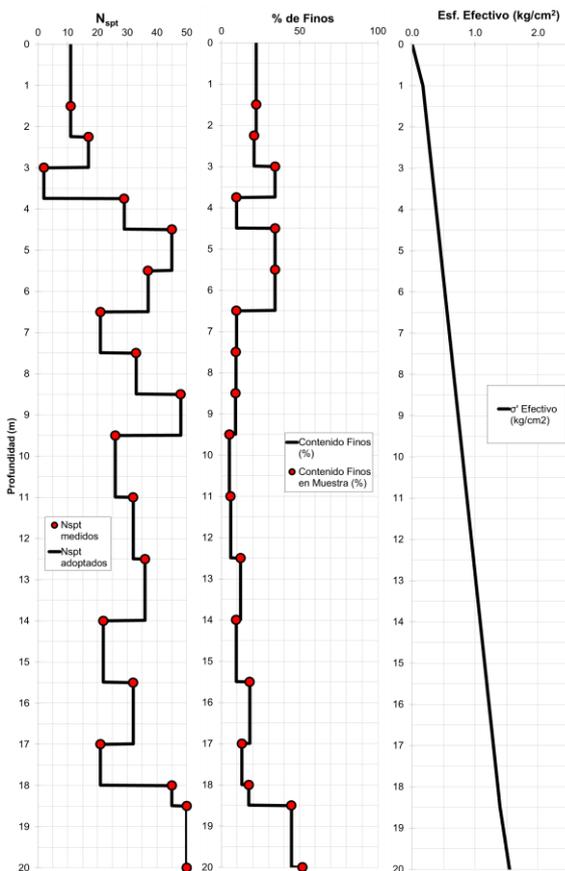
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-10

PARÁMETROS DE ENTRADA:

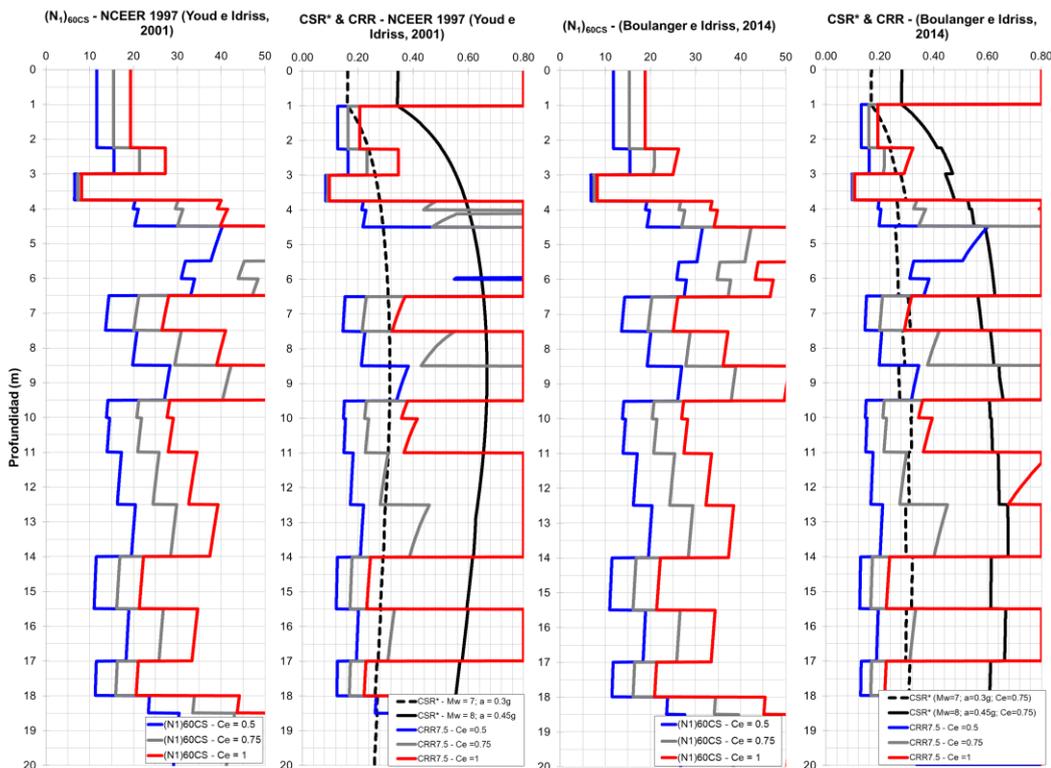
Sondaje	: SPT-10
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

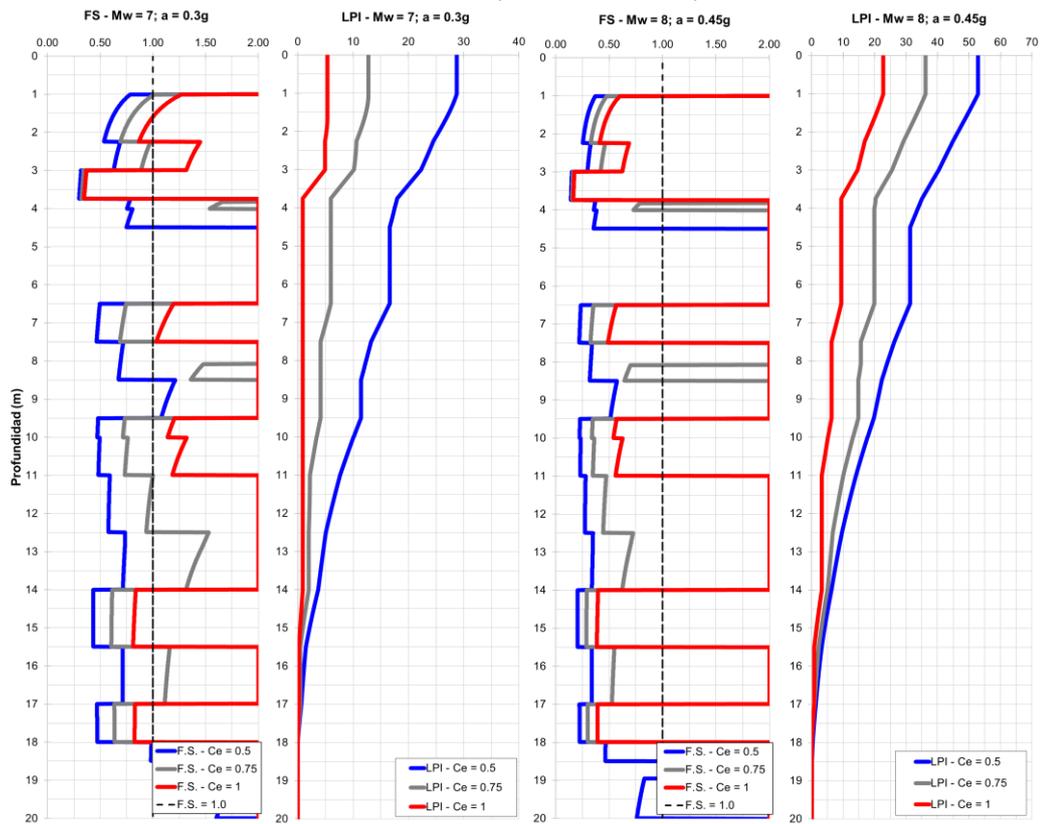
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	28.8	Efectos severos
		0.75	12.8	Probables efectos severos
		1	5.3	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	31.5	Efectos severos
		0.75	15.0	Probables efectos severos
		1	6.2	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	52.9	Efectos severos
		0.75	36.2	Efectos severos
		1	22.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	54.2	Efectos severos
		0.75	38.2	Efectos severos
		1	22.0	Efectos severos



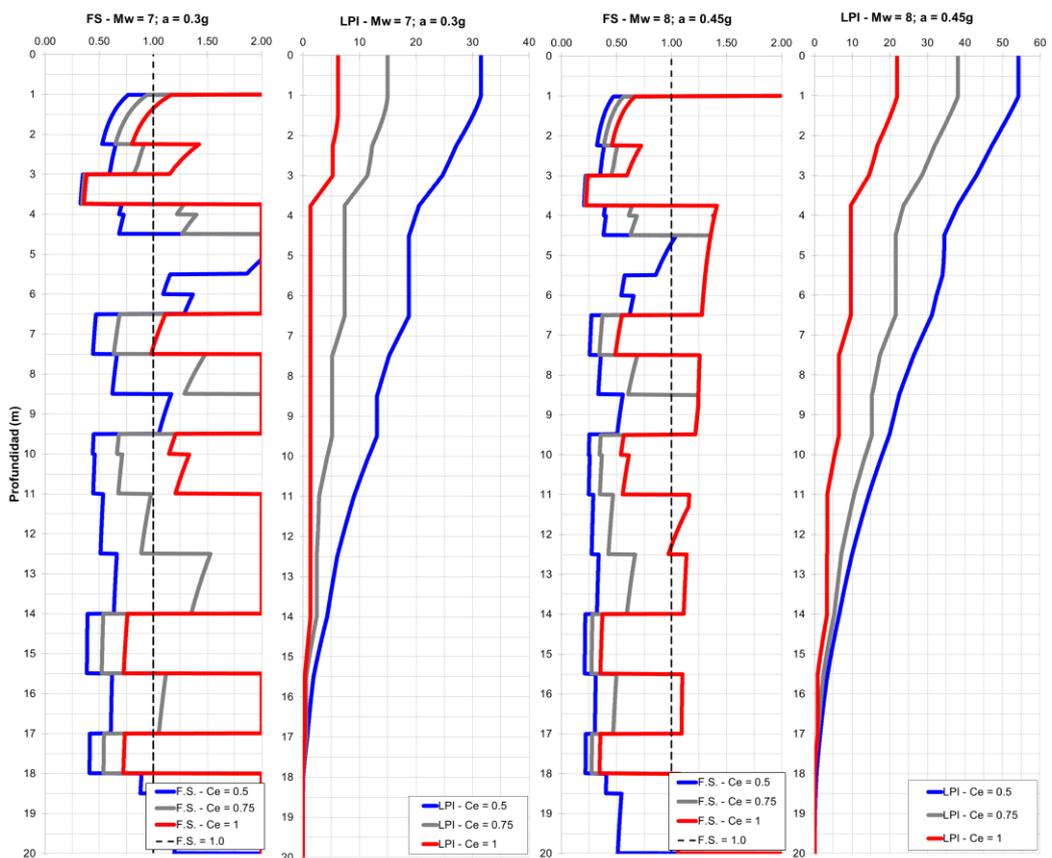
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



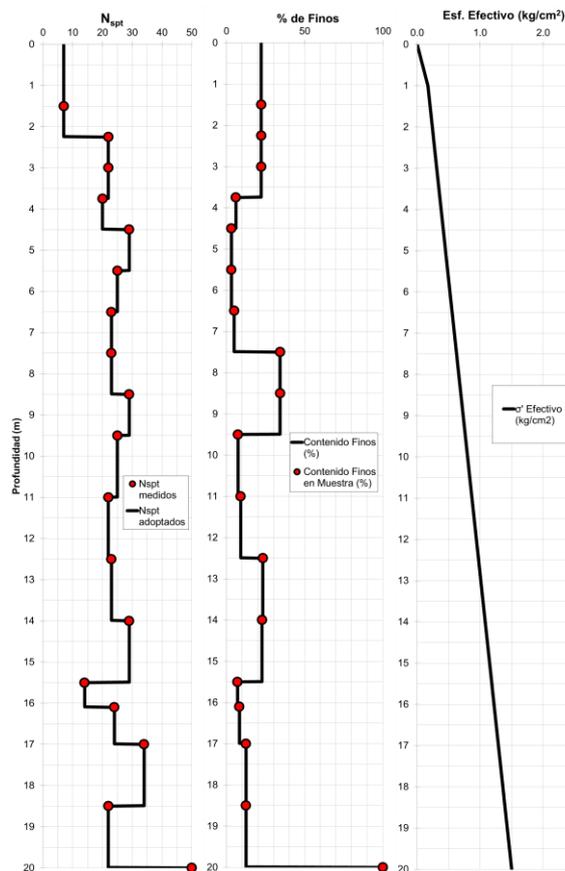
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-11

PARÁMETROS DE ENTRADA:

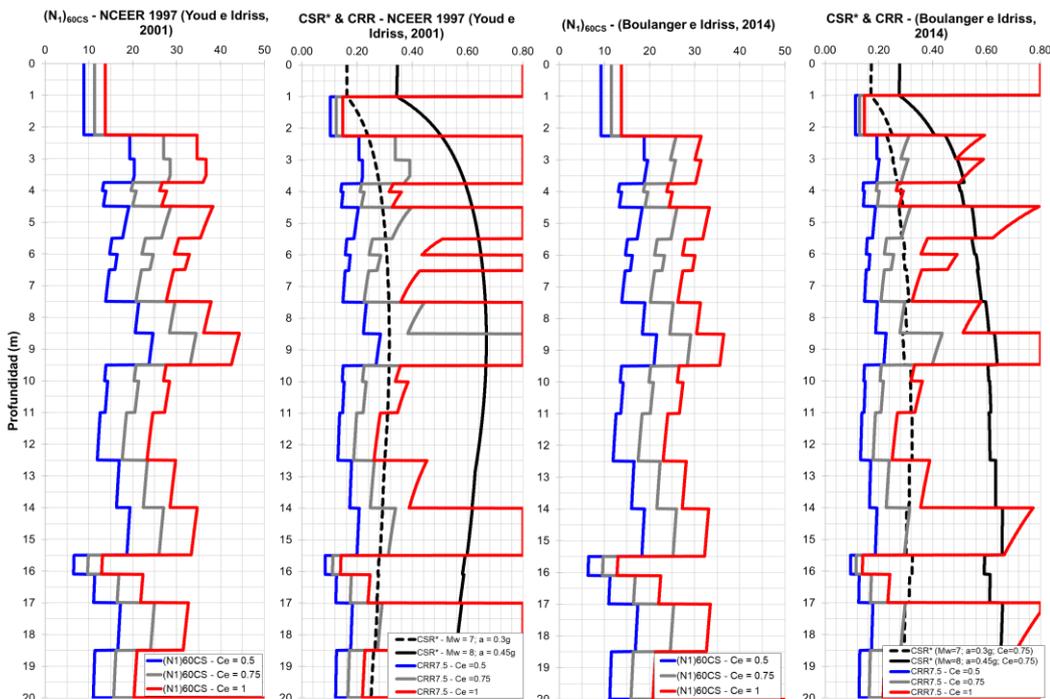
Sondaje	: SPT-11
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

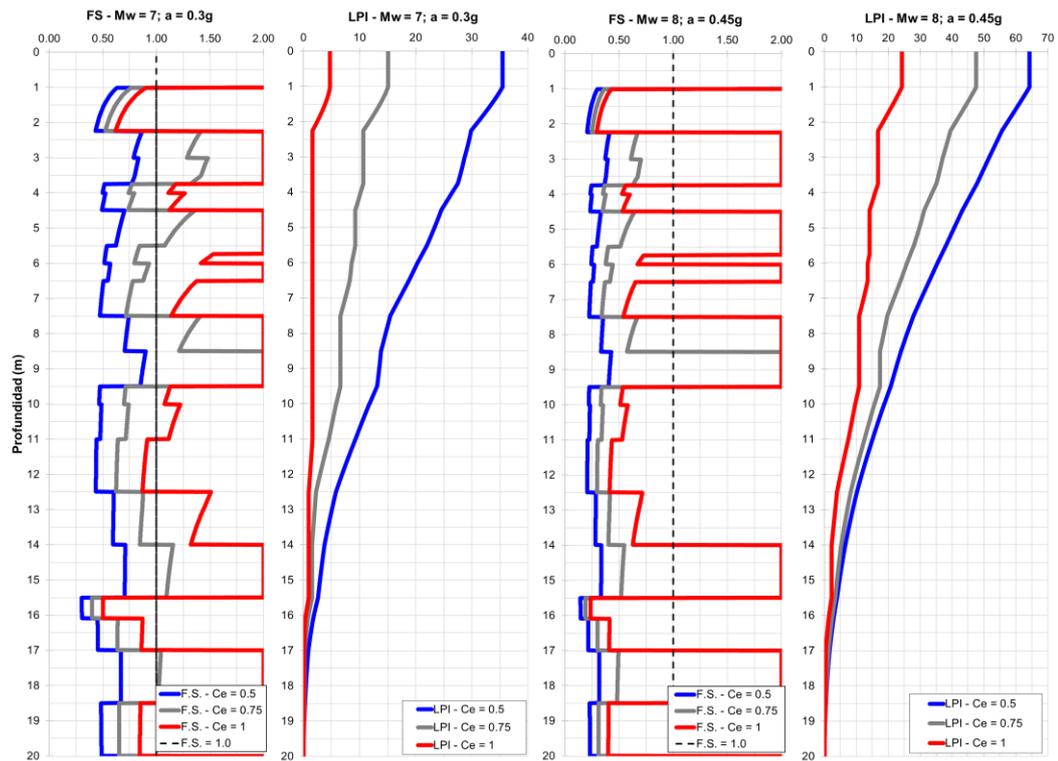
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	35.5	Efectos severos
		0.8	15.1	Efectos severos
		1	4.7	No hay efectos de licuación
	Boulangier e Idriss (2014)	0.5	40.2	Efectos severos
		0.8	18.3	Efectos severos
		1	5.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	64.3	Efectos severos
		0.8	47.6	Efectos severos
		1	24.2	Efectos severos
	Boulangier e Idriss (2014)	0.5	62.0	Efectos severos
		0.8	50.3	Efectos severos
		1	27.0	Efectos severos



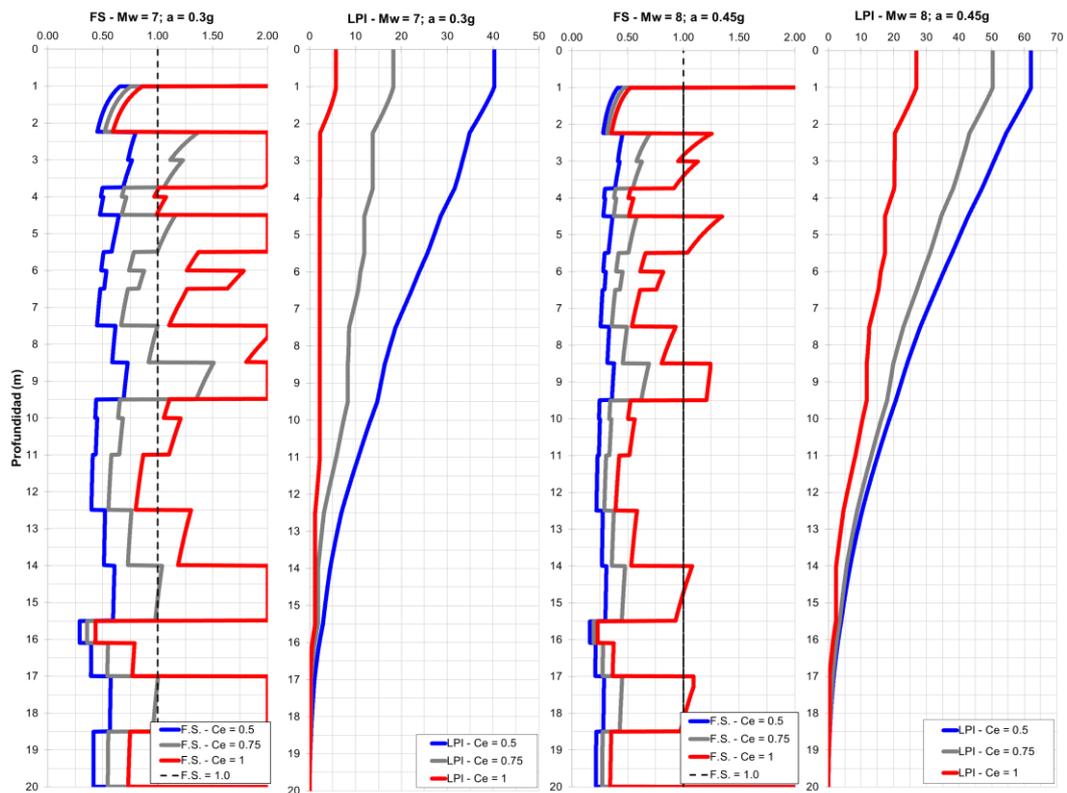
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



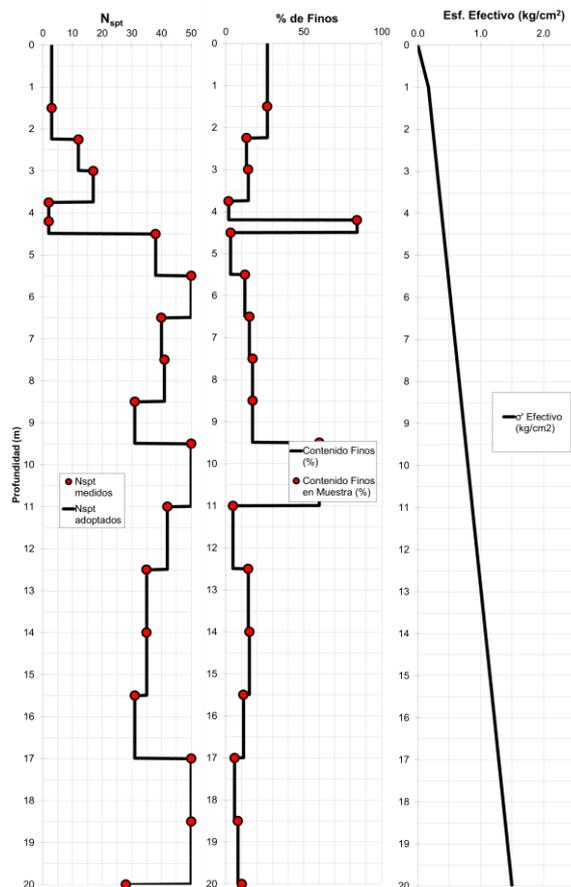
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-12

PARÁMETROS DE ENTRADA:

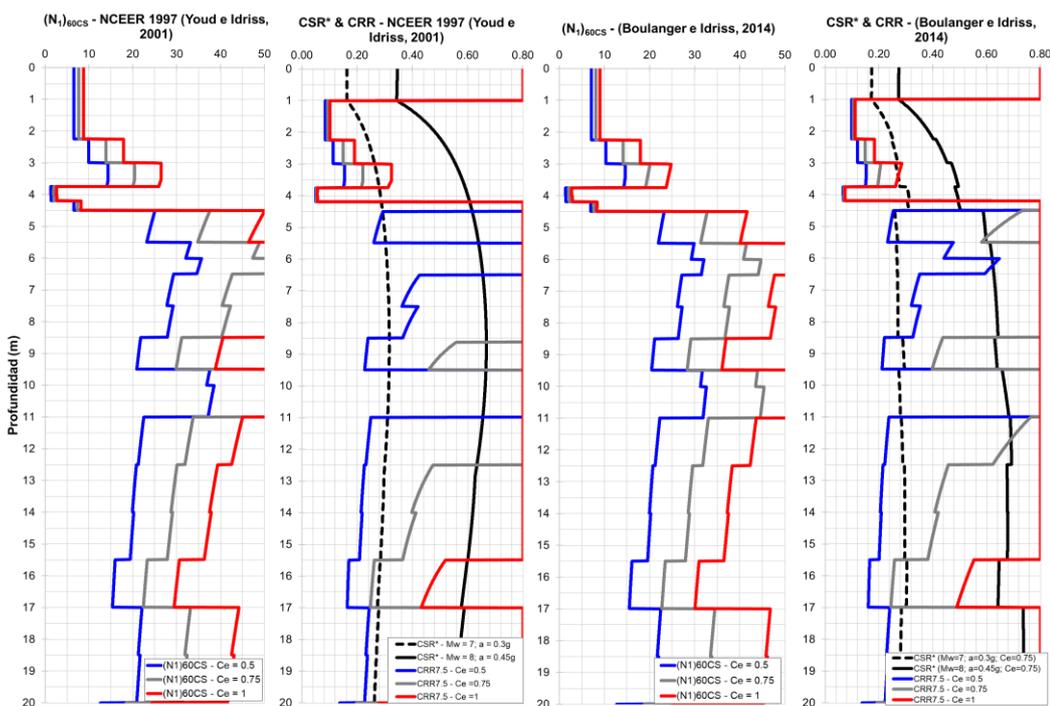
Sondaje	: SPT-12
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

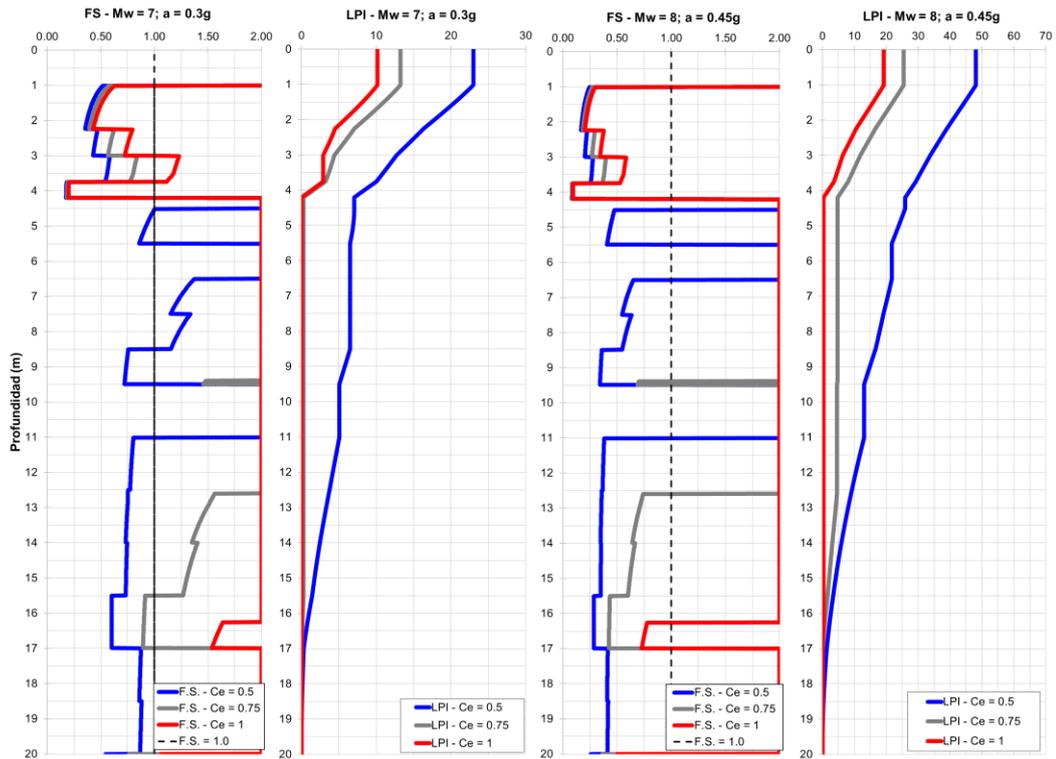
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	23.0	Efectos severos
		0.8	13.2	Probables efectos severos
		1	10.1	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	24.8	Efectos severos
		0.8	13.5	Probables efectos severos
		1	10.1	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	48.1	Efectos severos
		0.8	25.5	Efectos severos
		1	19.2	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	47.5	Efectos severos
		0.8	26.1	Efectos severos
		1	18.1	Efectos severos



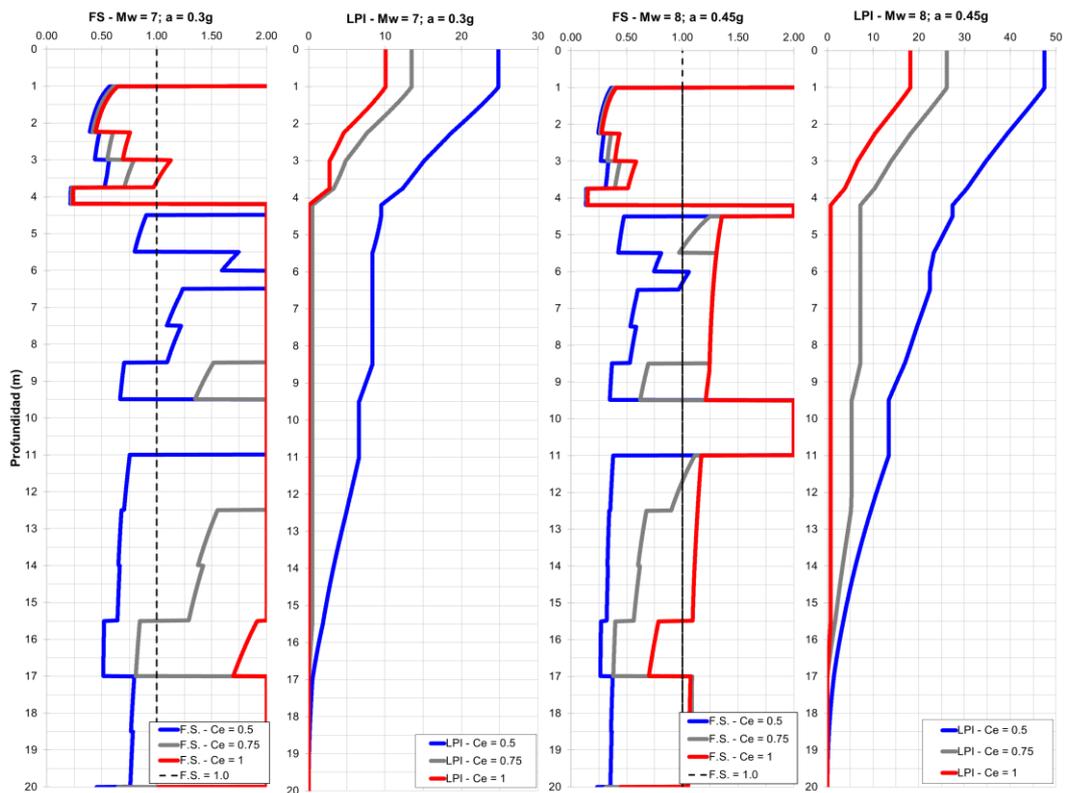
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOUDE E IDRISSE, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRISSE (2014):



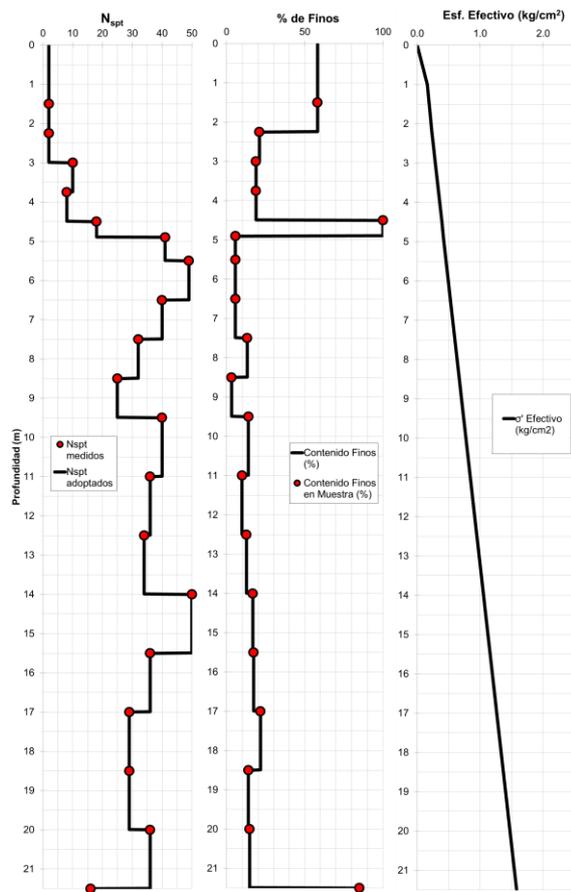
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-13

PARÁMETROS DE ENTRADA:

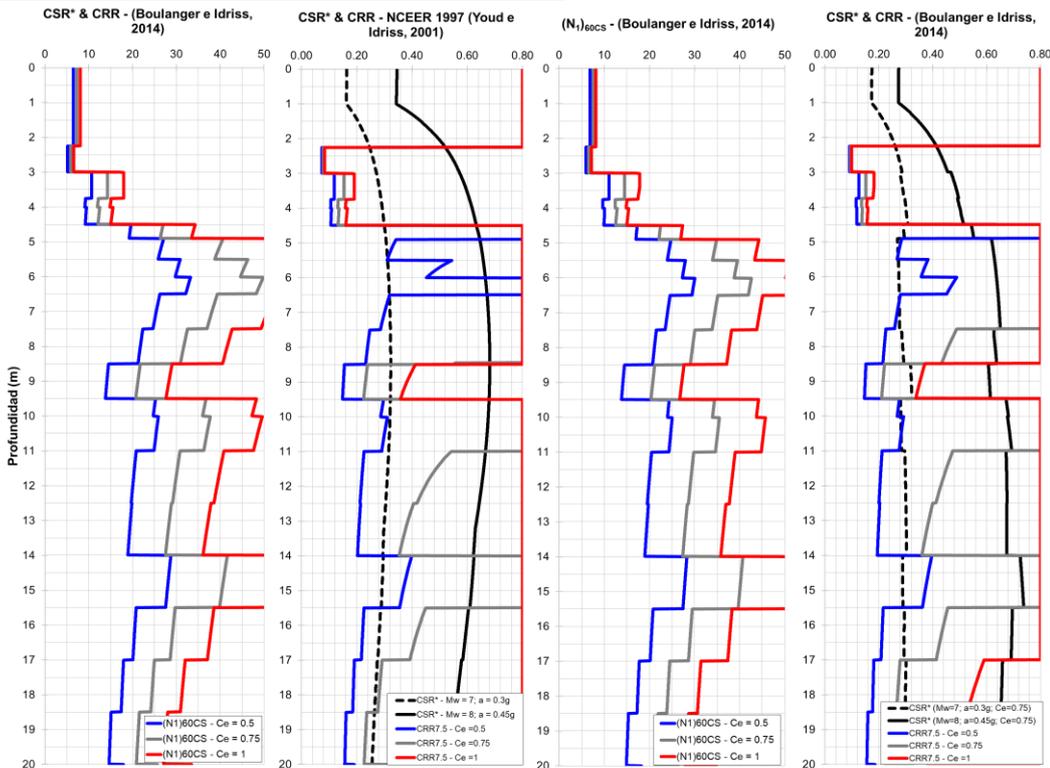
Sondaje	: SPT-13
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

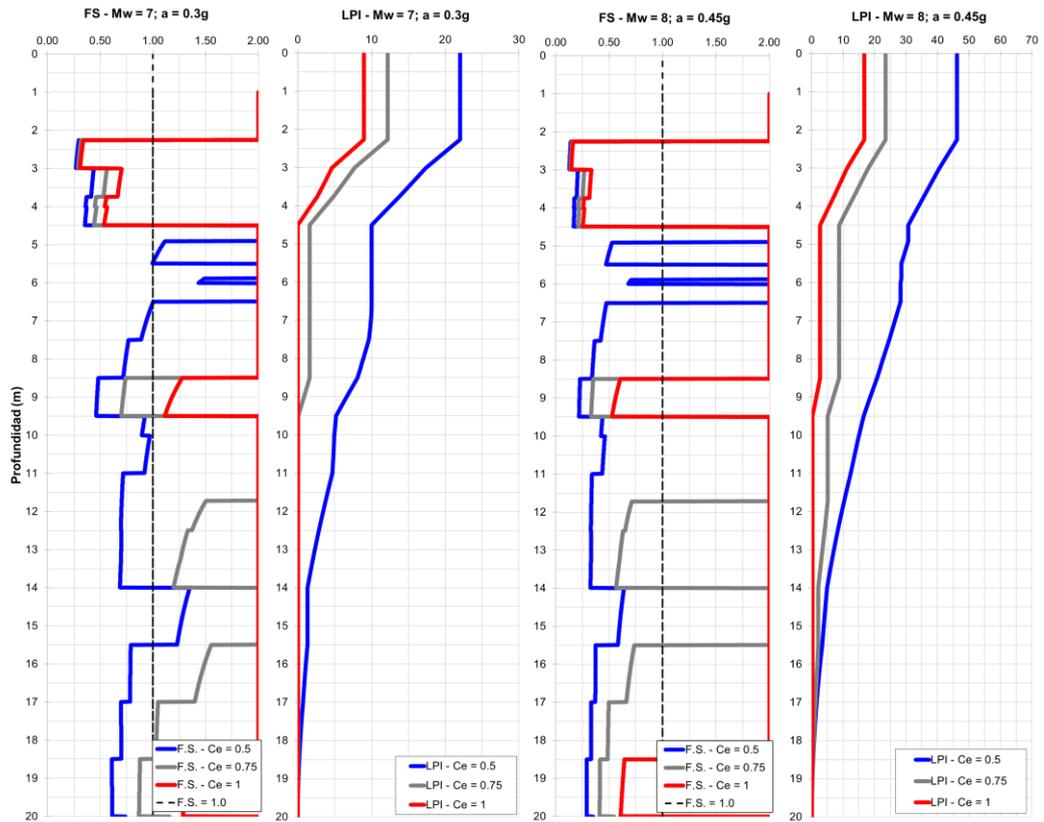
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	22.0	Efectos severos
		0.8	12.2	Probables efectos severos
		1	9.0	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	24.2	Efectos severos
		0.8	12.5	Probables efectos severos
		1	9.2	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	46.1	Efectos severos
		0.8	23.5	Efectos severos
		1	16.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	47.2	Efectos severos
		0.8	25.6	Efectos severos
		1	16.1	Efectos severos



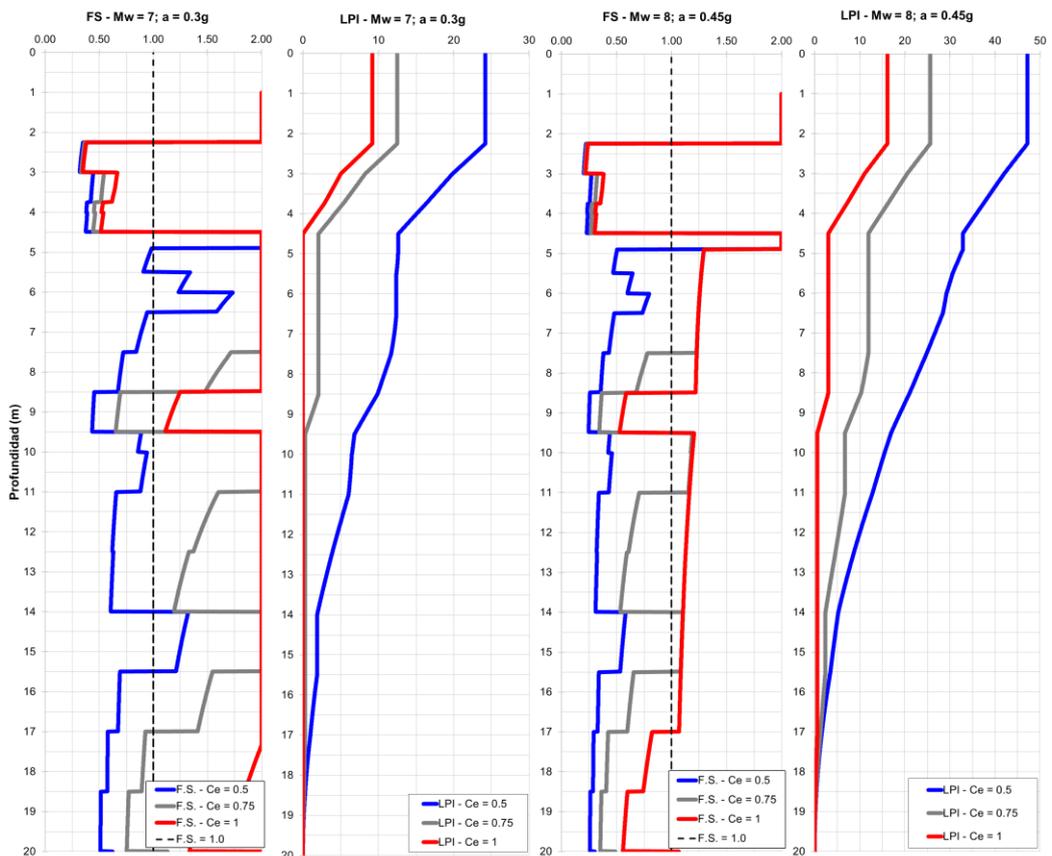
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



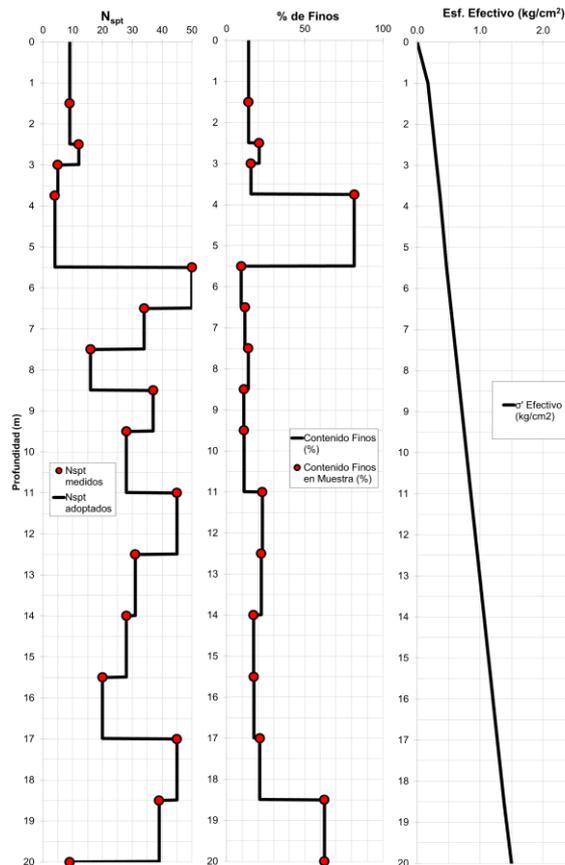
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-14

PARÁMETROS DE ENTRADA:

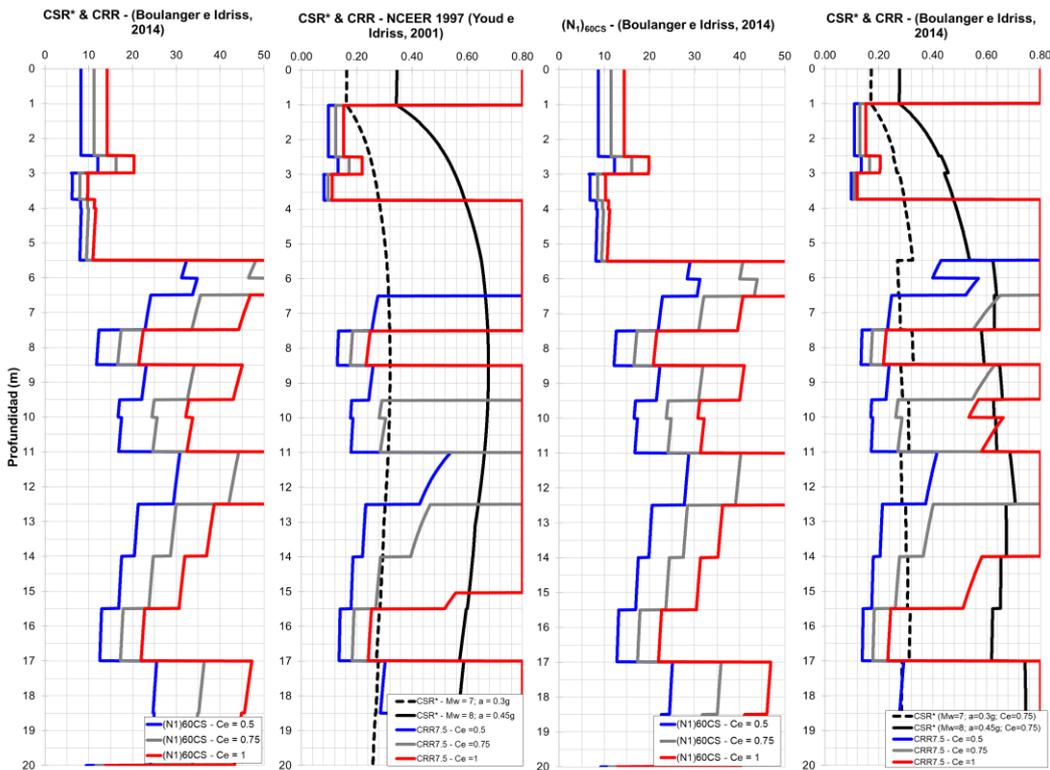
Sondaje	: SPT-14
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

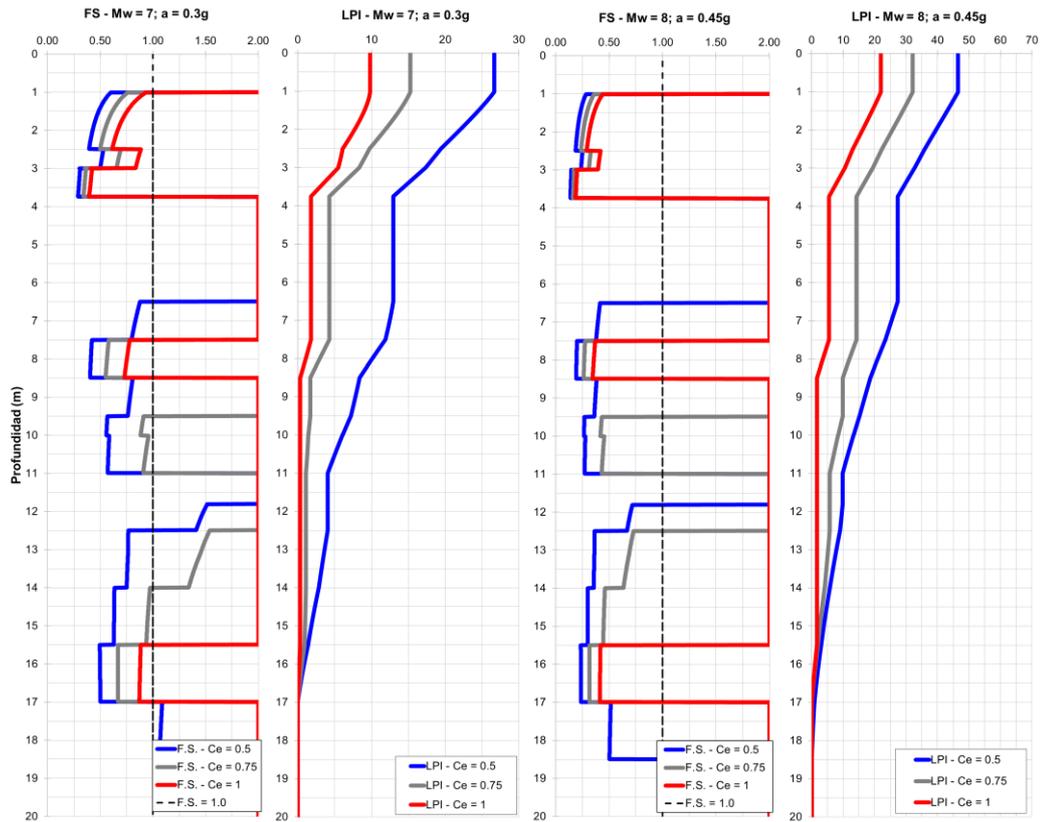
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	26.7	Efectos severos
		0.8	15.3	Efectos severos
		1	9.8	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	28.2	Efectos severos
		0.8	16.4	Efectos severos
		1	10.9	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	46.6	Efectos severos
		0.8	32.1	Efectos severos
		1	22.0	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	47.7	Efectos severos
		0.8	31.9	Efectos severos
		1	22.1	Efectos severos



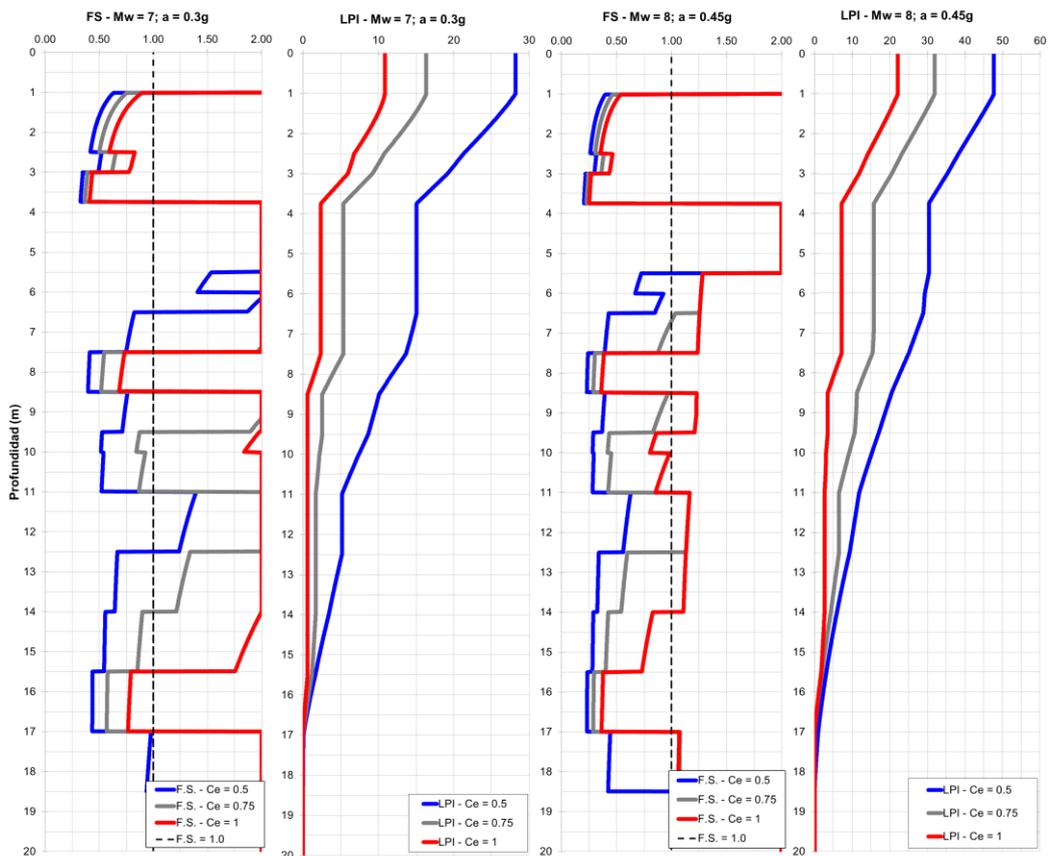
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



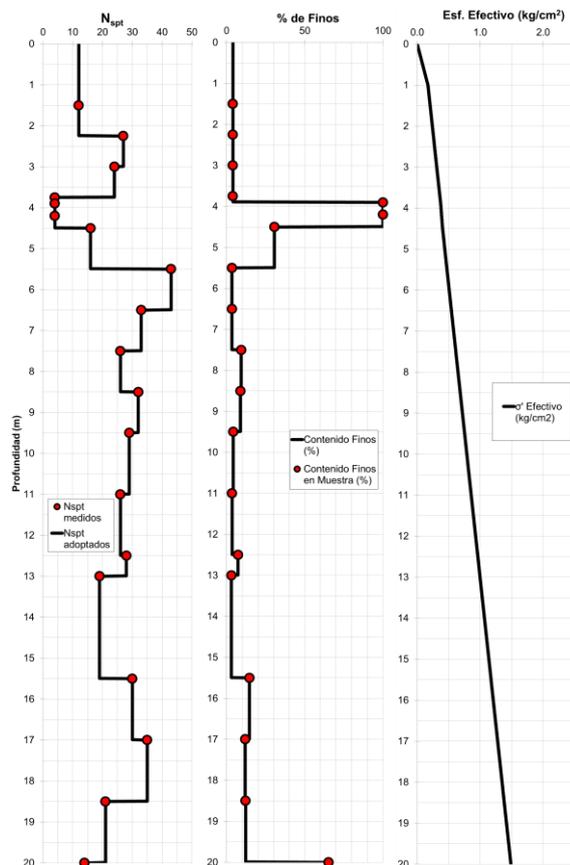
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-15

PARÁMETROS DE ENTRADA:

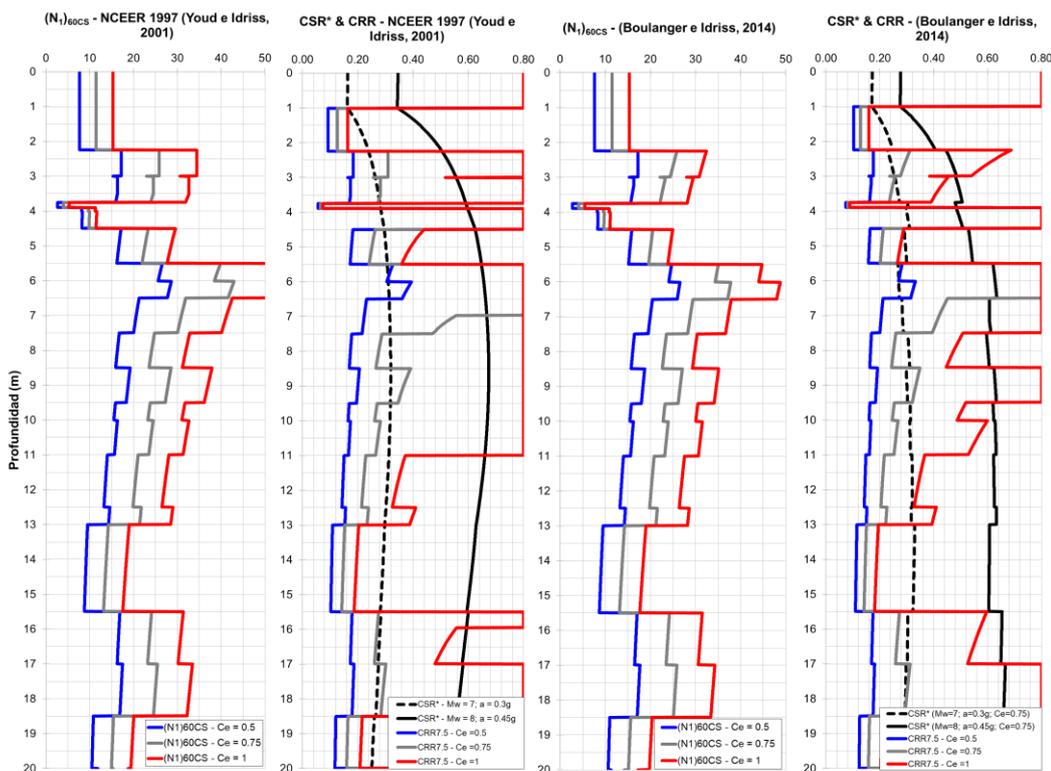
Sondaje	: SPT-15
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

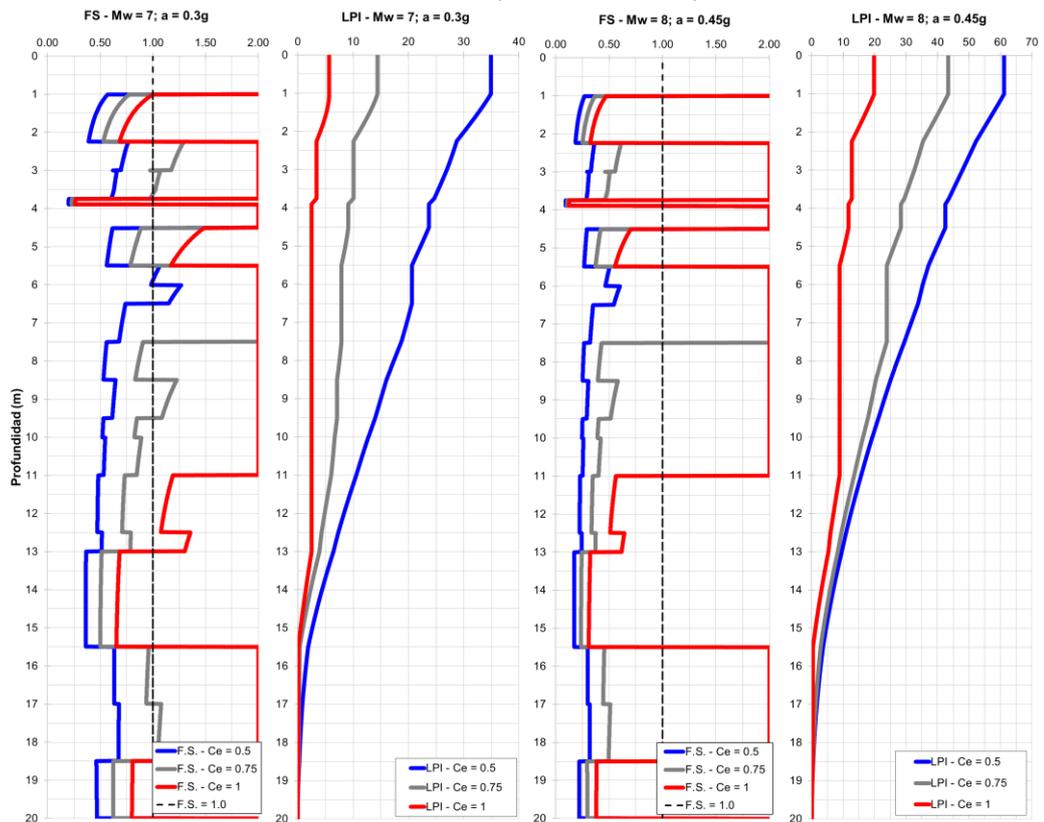
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	34.9	Efectos severos
		0.8	14.4	Probables efectos severos
		1	5.7	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	37.9	Efectos severos
		0.8	17.8	Efectos severos
		1	7.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	61.1	Efectos severos
		0.8	43.4	Efectos severos
		1	19.8	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	58.7	Efectos severos
		0.8	44.5	Efectos severos
		1	24.7	Efectos severos



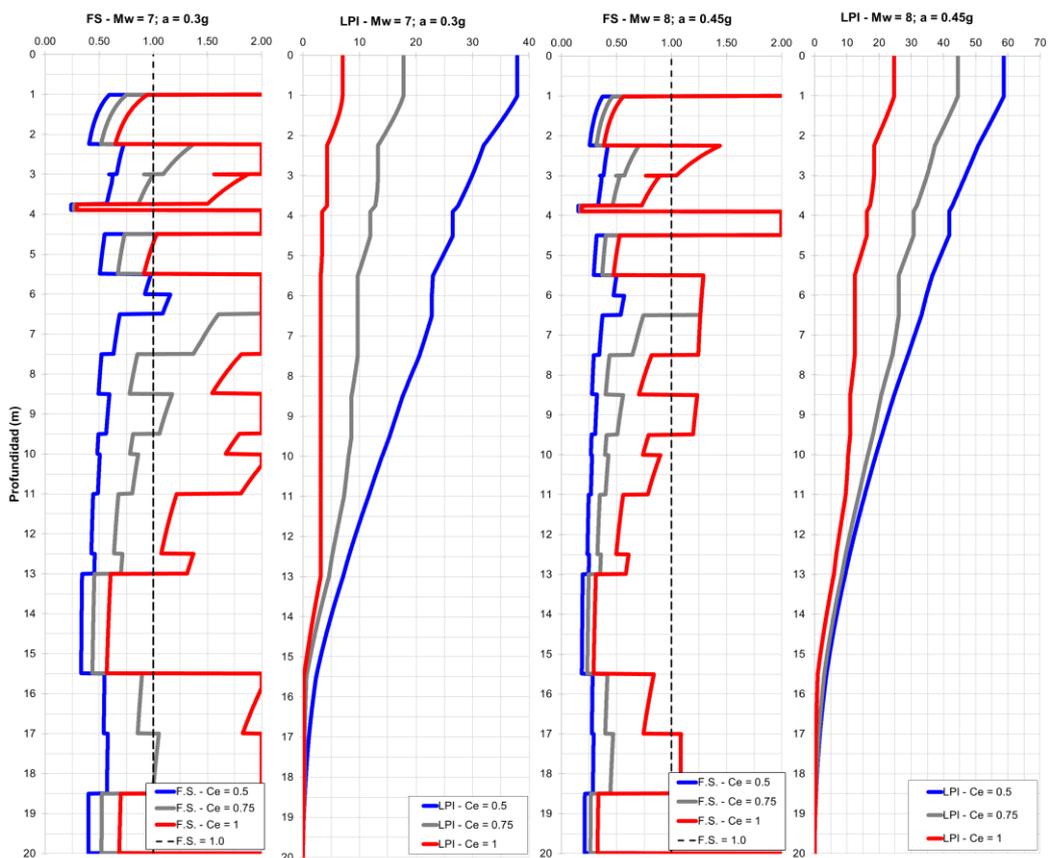
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



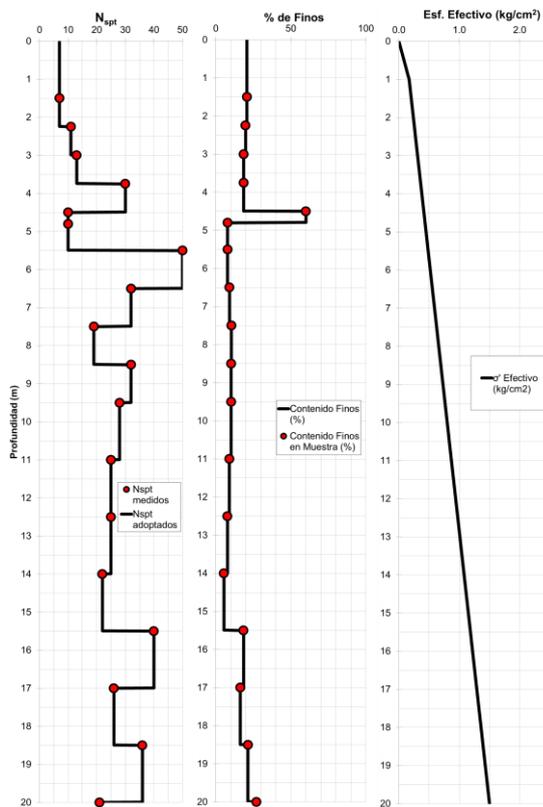
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-16

PARÁMETROS DE ENTRADA:

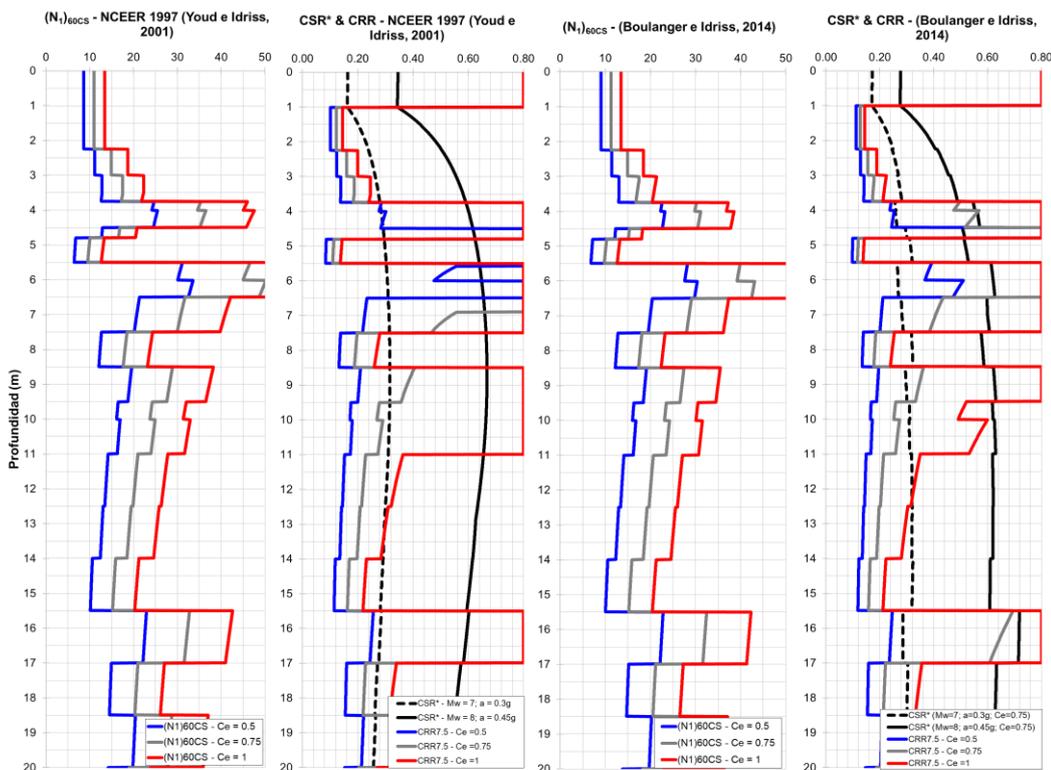
Sondaje	: SPT-16
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

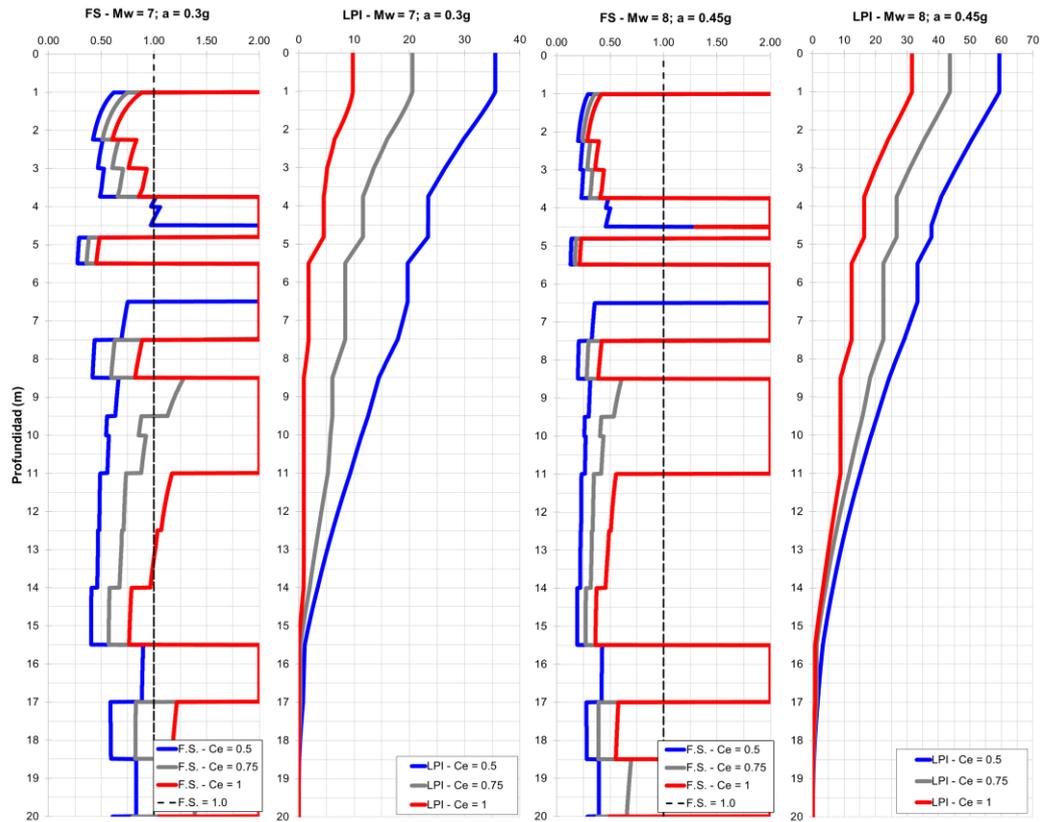
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	35.6	Efectos severos
		0.8	20.5	Efectos severos
		1	9.8	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	38.2	Efectos severos
		0.8	23.0	Efectos severos
		1	11.9	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	59.3	Efectos severos
		0.8	43.6	Efectos severos
		1	31.5	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	58.7	Efectos severos
		0.8	44.8	Efectos severos
		1	31.7	Efectos severos



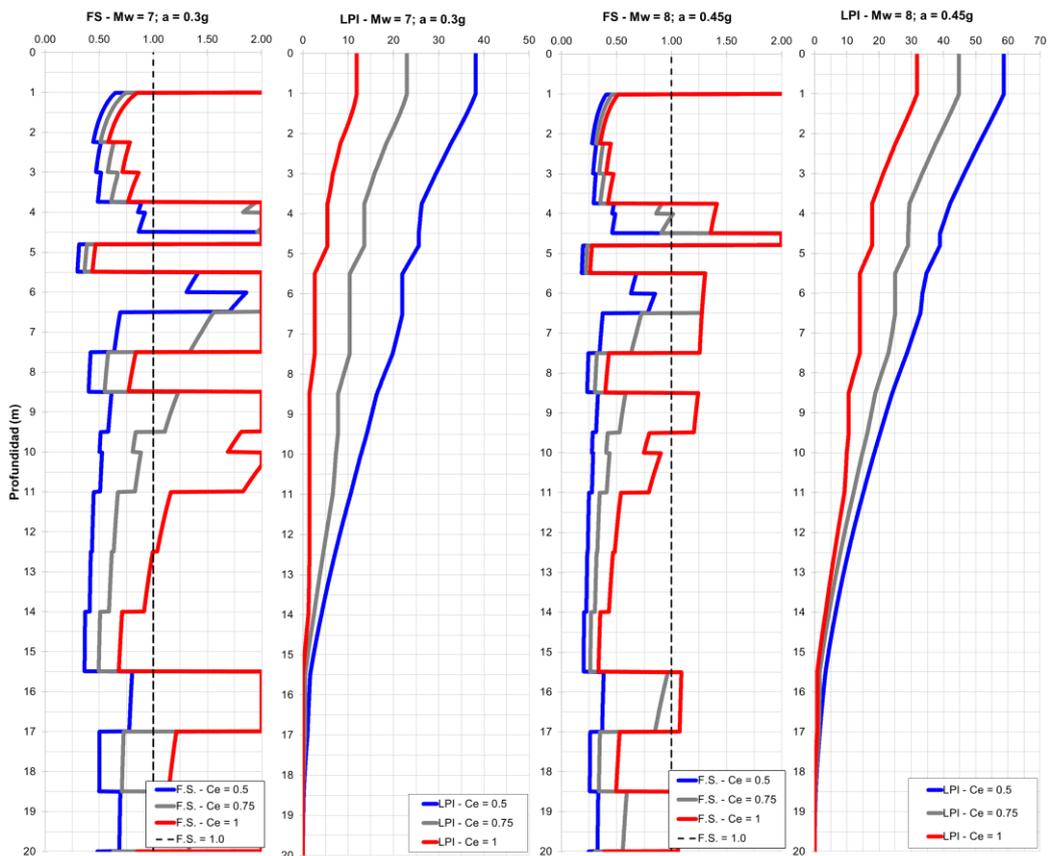
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



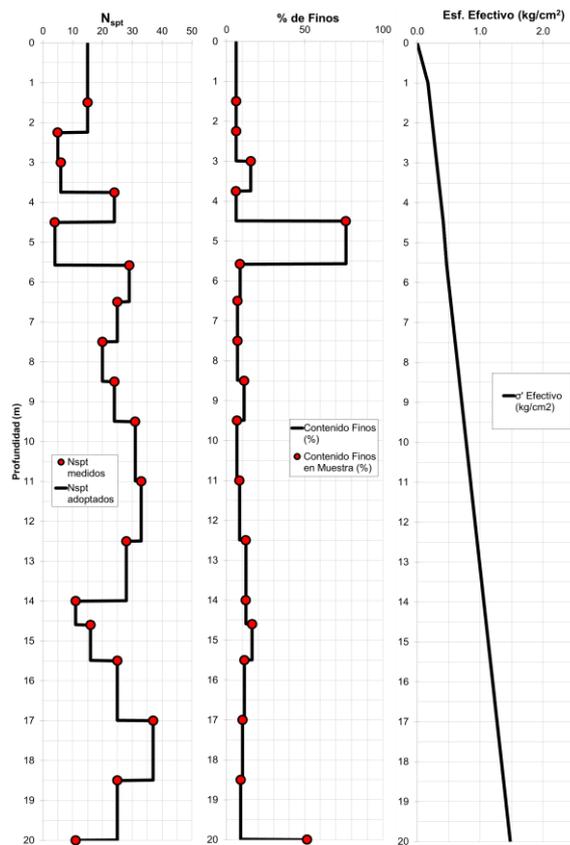
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-17

PARÁMETROS DE ENTRADA:

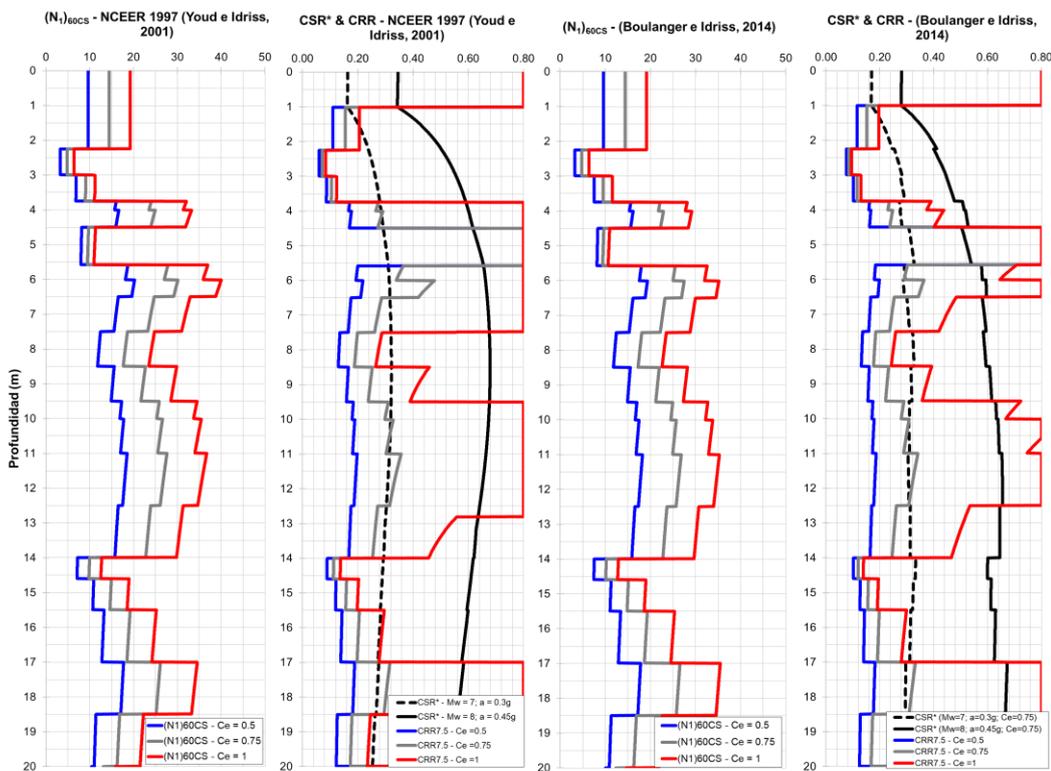
Sondaje	: SPT-16
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

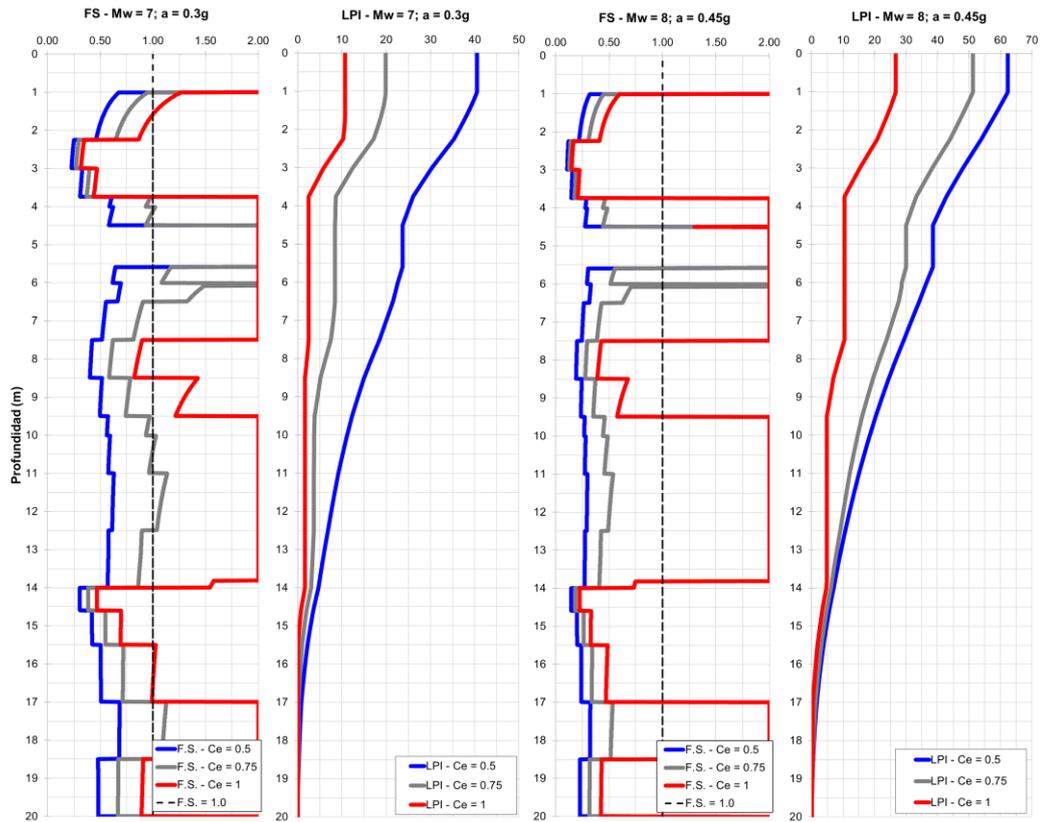
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	40.5	Efectos severos
		0.8	19.9	Efectos severos
		1	10.7	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	42.7	Efectos severos
		0.8	22.6	Efectos severos
		1	11.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	62.4	Efectos severos
		0.8	51.3	Efectos severos
		1	26.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	59.6	Efectos severos
		0.8	50.3	Efectos severos
		1	30.0	Efectos severos



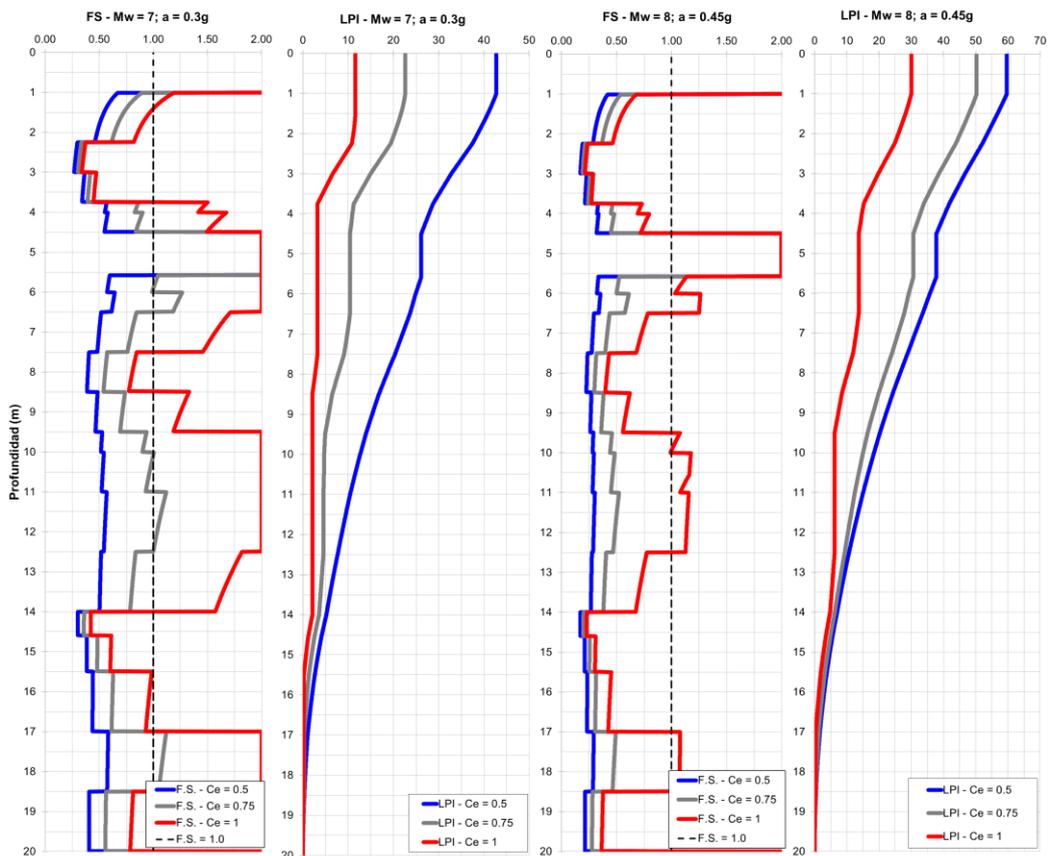
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



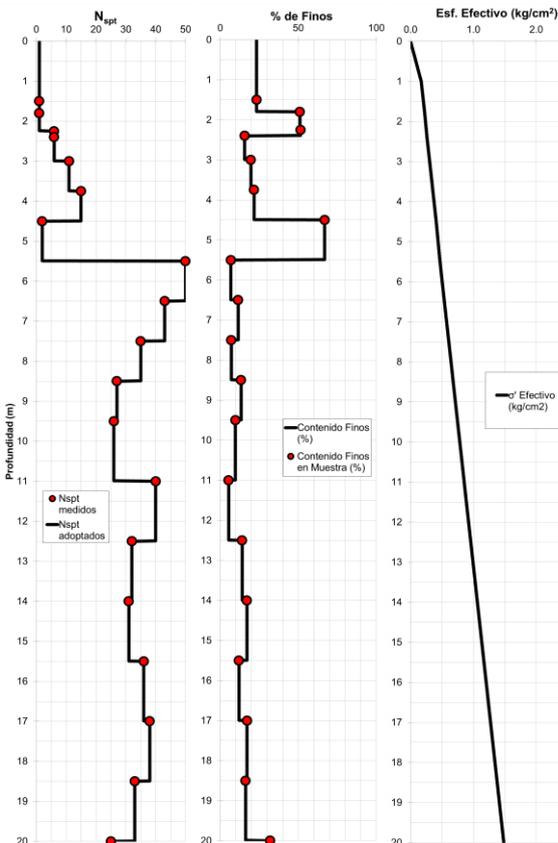
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-18

PARÁMETROS DE ENTRADA:

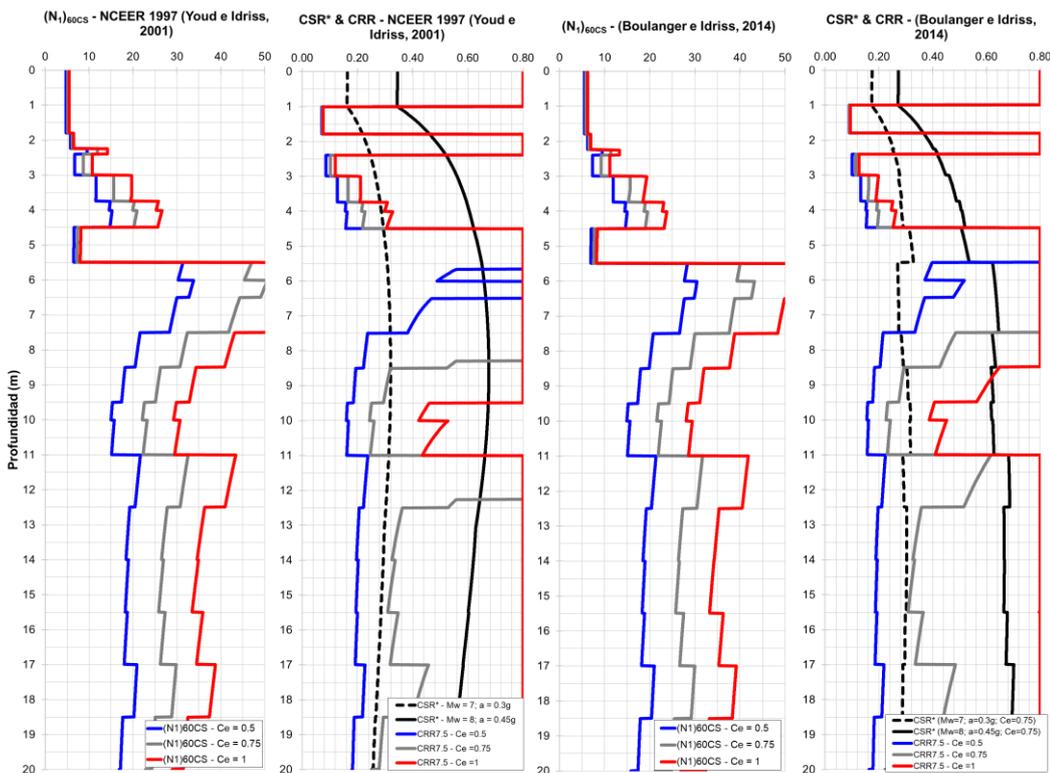
Sondaje	: SPT-18
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

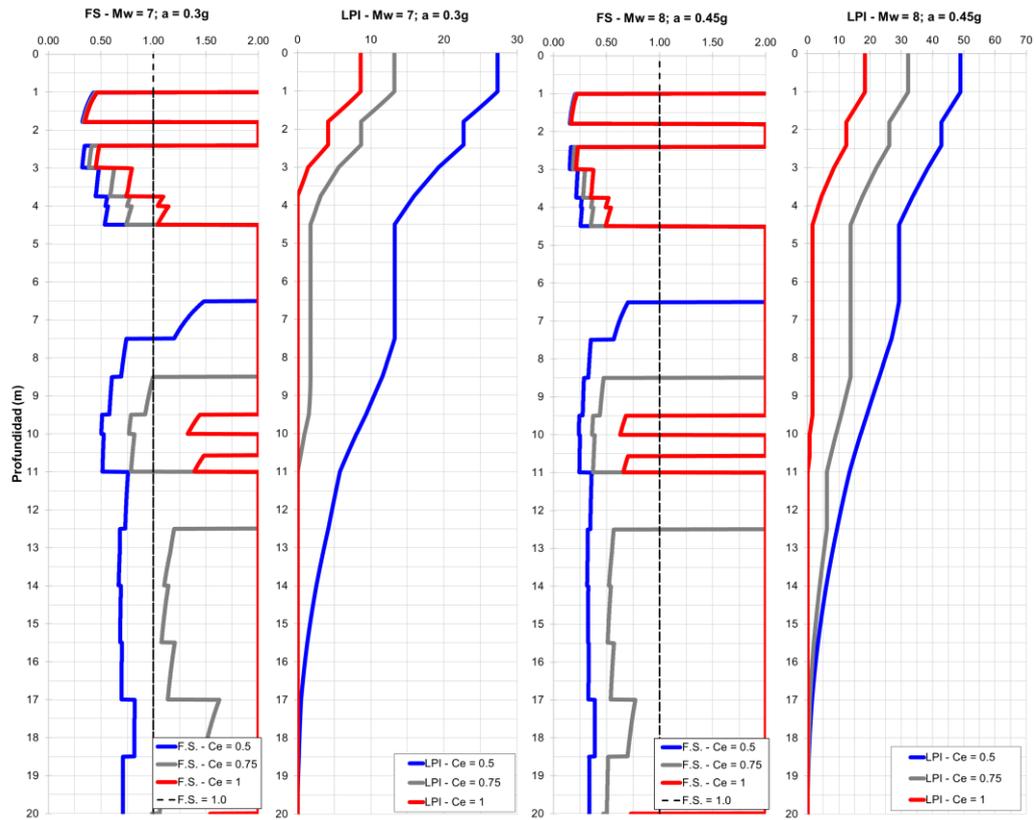
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	27.3	Efectos severos
		0.8	13.2	Probables efectos severos
		1	8.6	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	29.3	Efectos severos
		0.8	13.9	Probables efectos severos
		1	9.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	48.9	Efectos severos
		0.8	32.2	Efectos severos
		1	18.4	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	49.4	Efectos severos
		0.8	33.9	Efectos severos
		1	18.8	Efectos severos



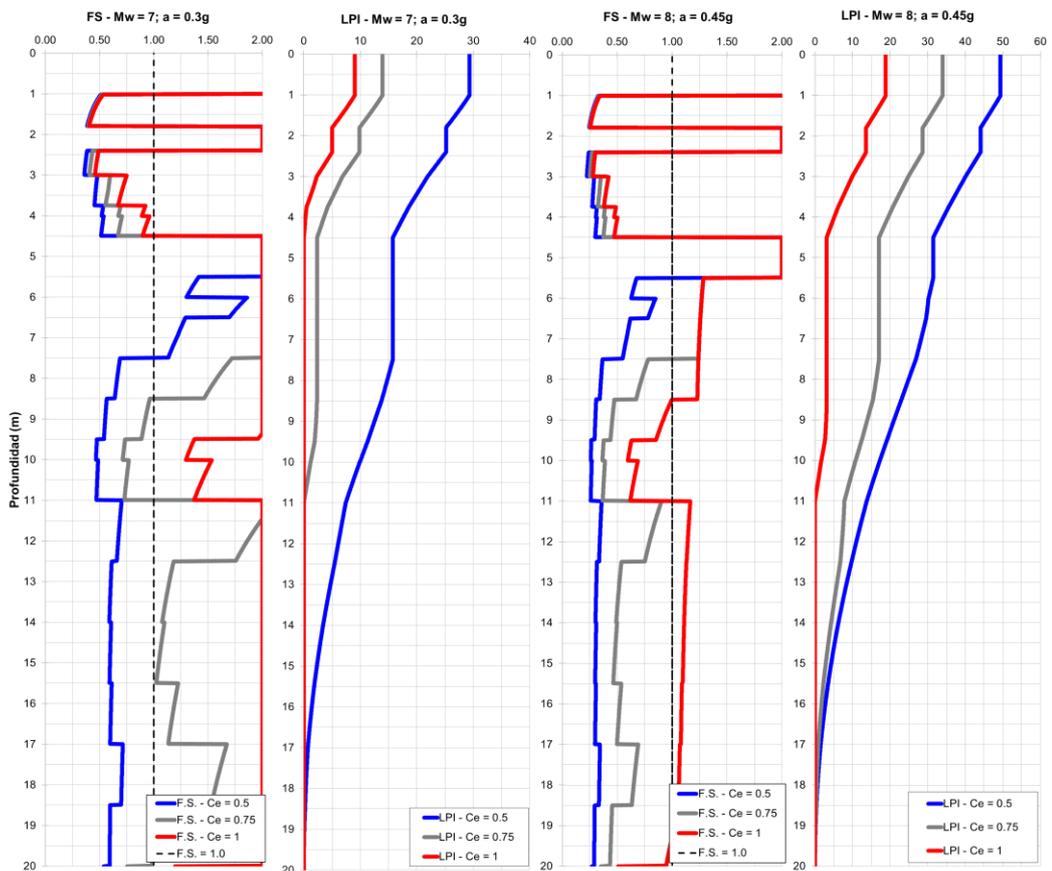
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDR ISS, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDR ISS (2014):



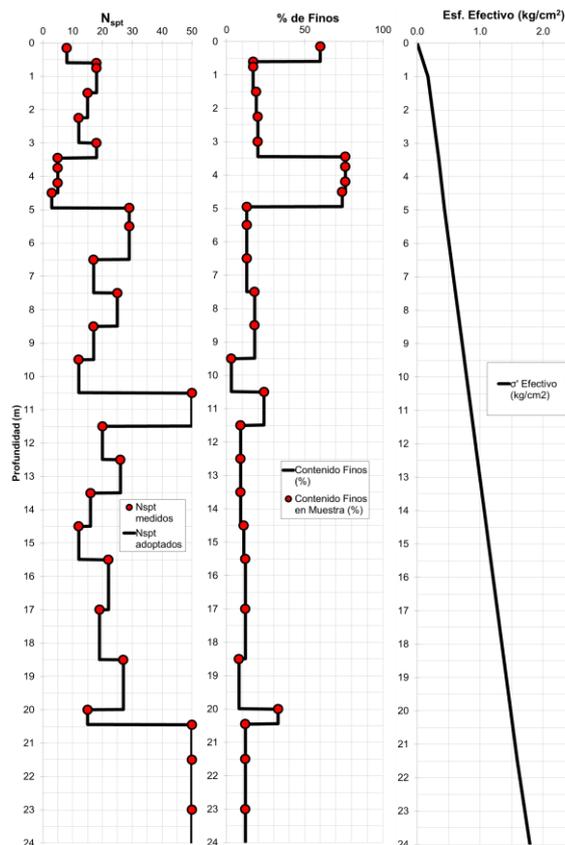
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-19

PARÁMETROS DE ENTRADA:

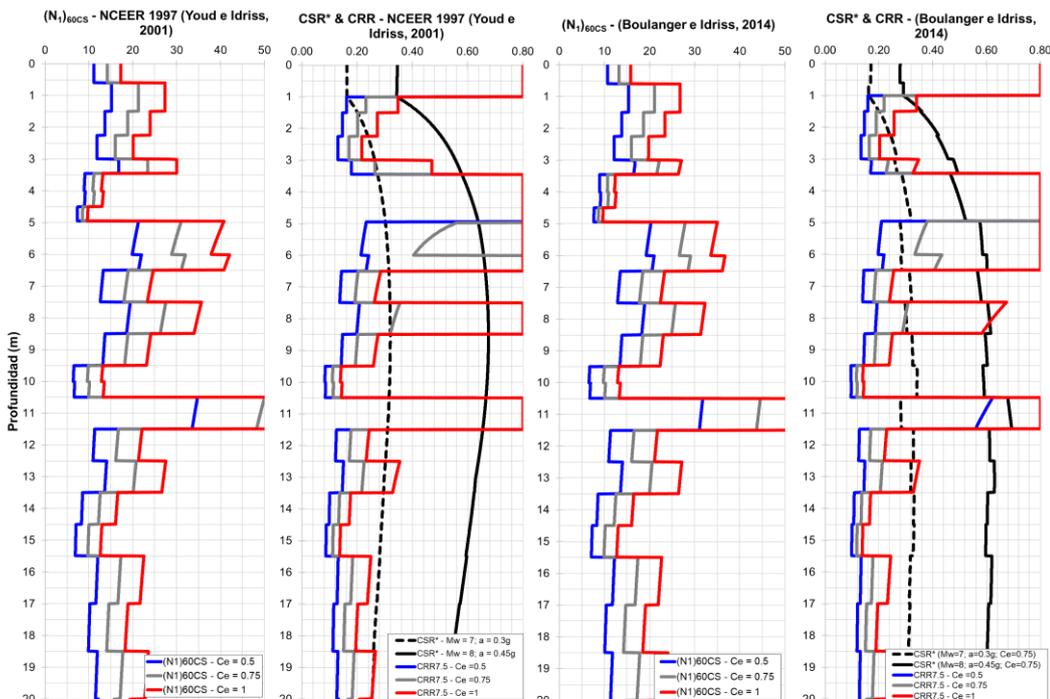
Sondaje	: SPT-19
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

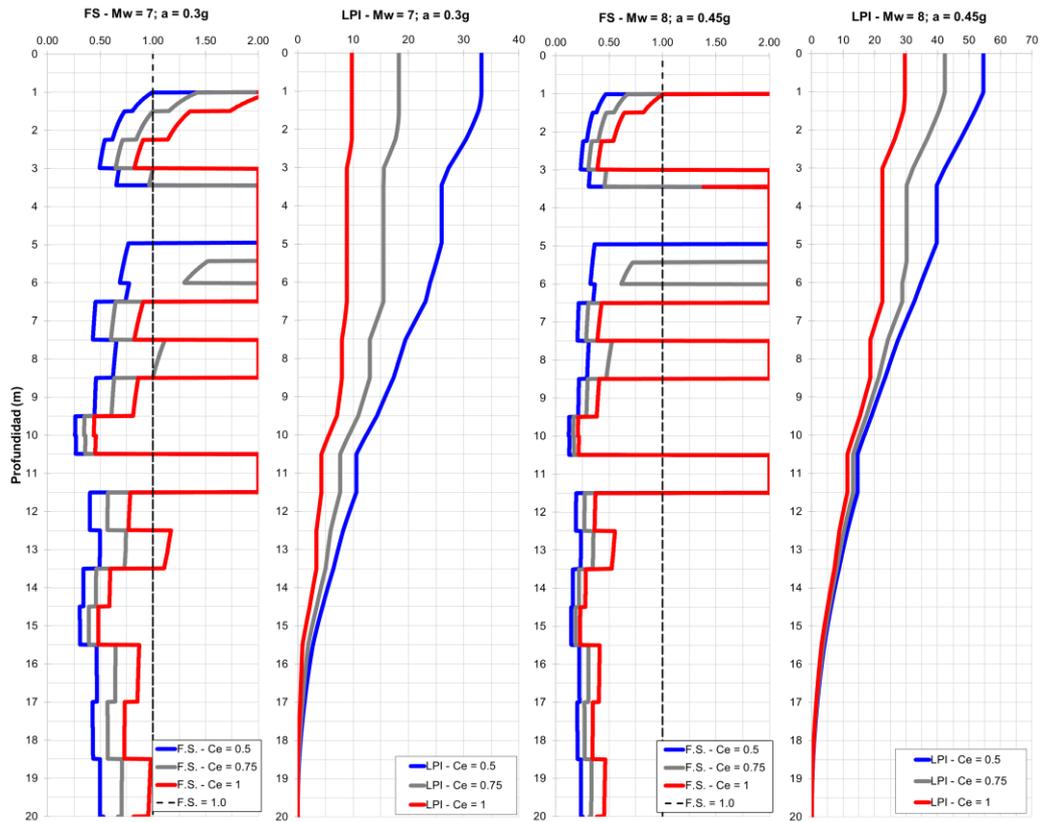
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	33.2	Efectos severos
		0.8	18.3	Efectos severos
		1	9.8	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	35.4	Efectos severos
		0.8	21.2	Efectos severos
		1	12.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	54.6	Efectos severos
		0.8	42.4	Efectos severos
		1	29.6	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	52.5	Efectos severos
		0.8	43.6	Efectos severos
		1	30.2	Efectos severos



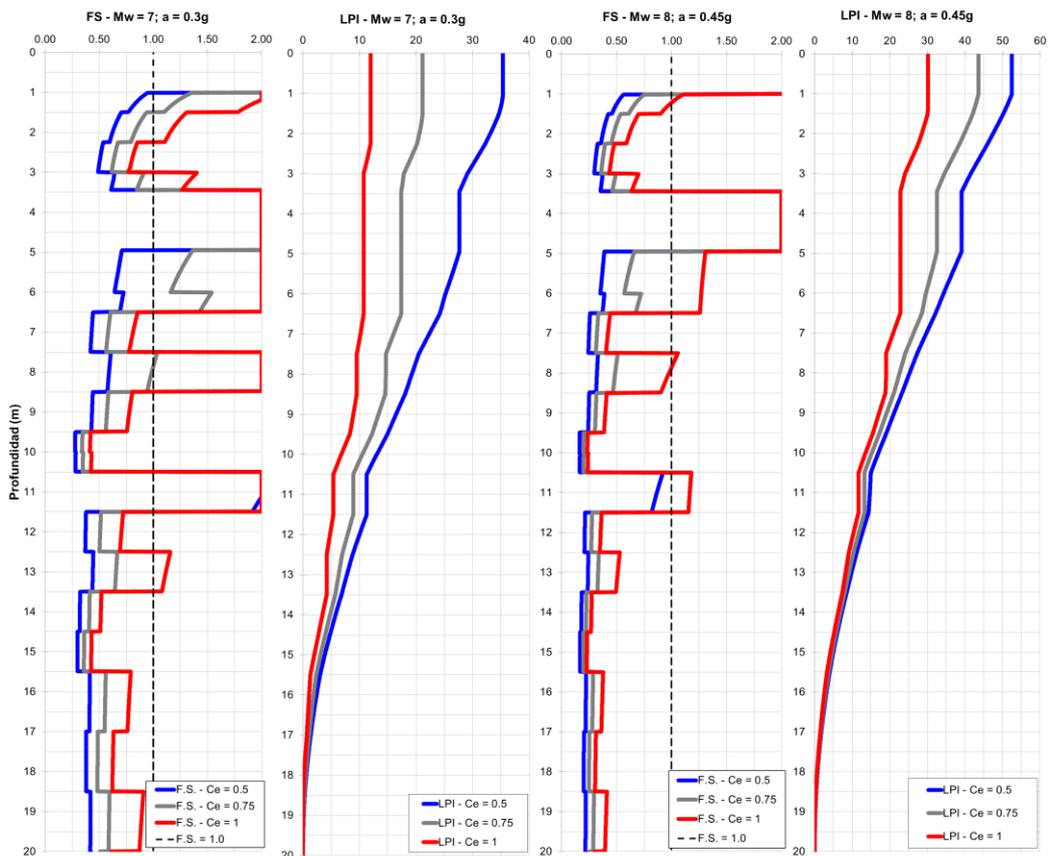
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



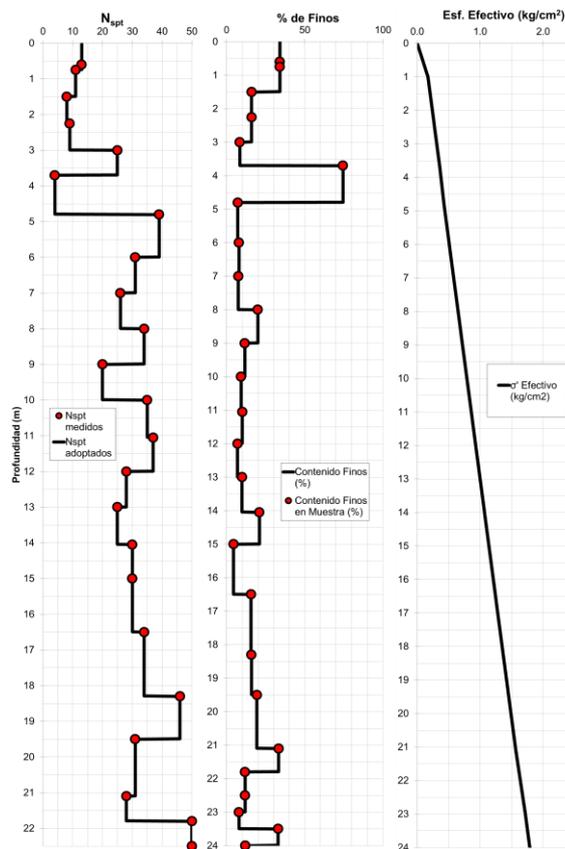
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-20

PARÁMETROS DE ENTRADA:

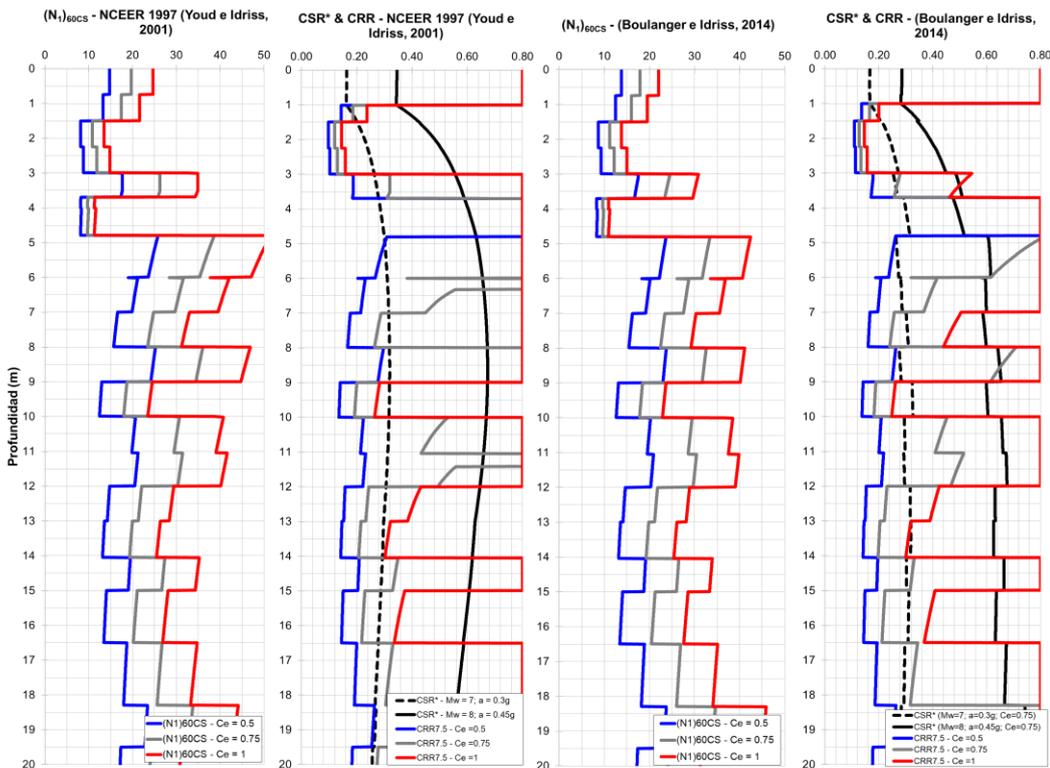
Sondaje	: SPT-20
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

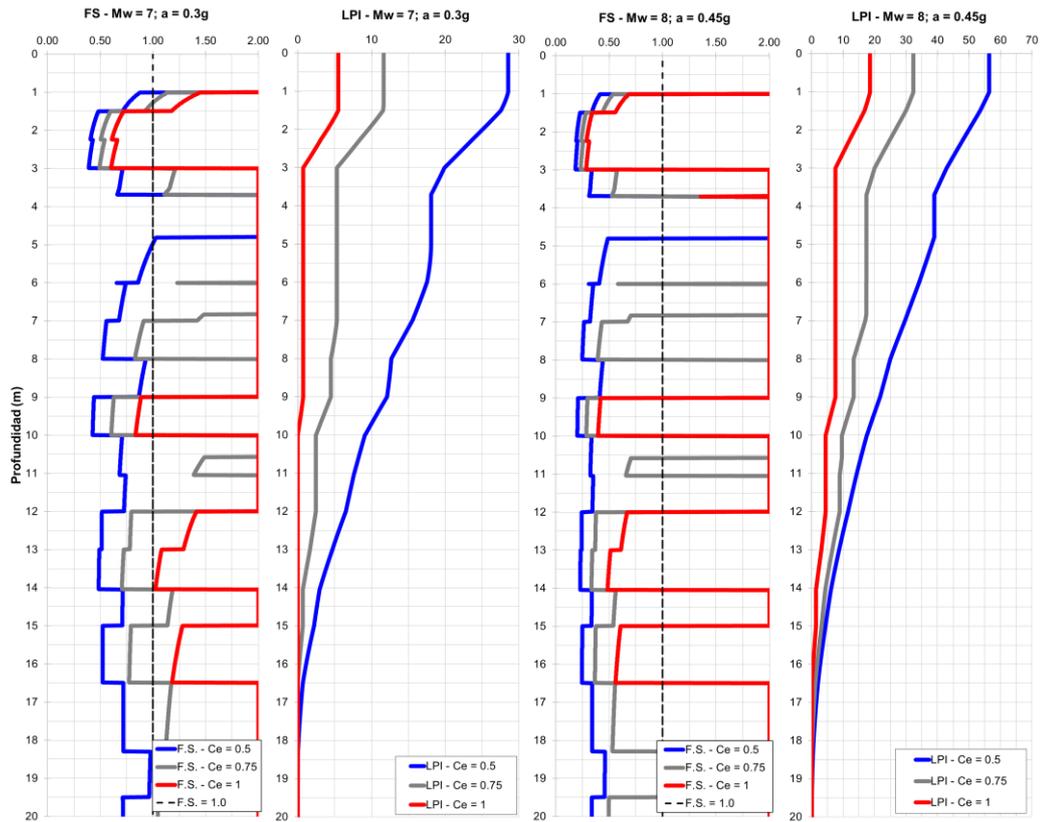
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	28.6	Efectos severos
		0.8	11.7	Probables efectos severos
		1	5.5	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	32.4	Efectos severos
		0.8	13.6	Probables efectos severos
		1	6.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	56.4	Efectos severos
		0.8	32.4	Efectos severos
		1	18.6	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	54.5	Efectos severos
		0.8	35.8	Efectos severos
		1	19.7	Efectos severos



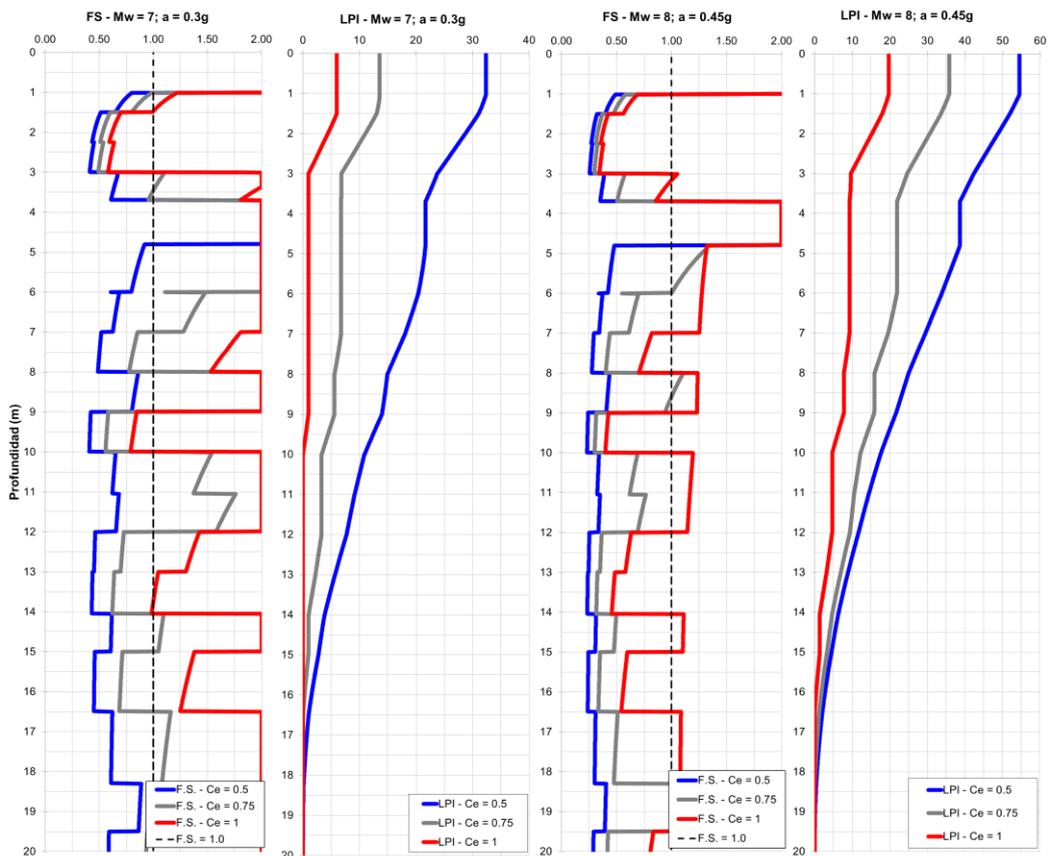
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



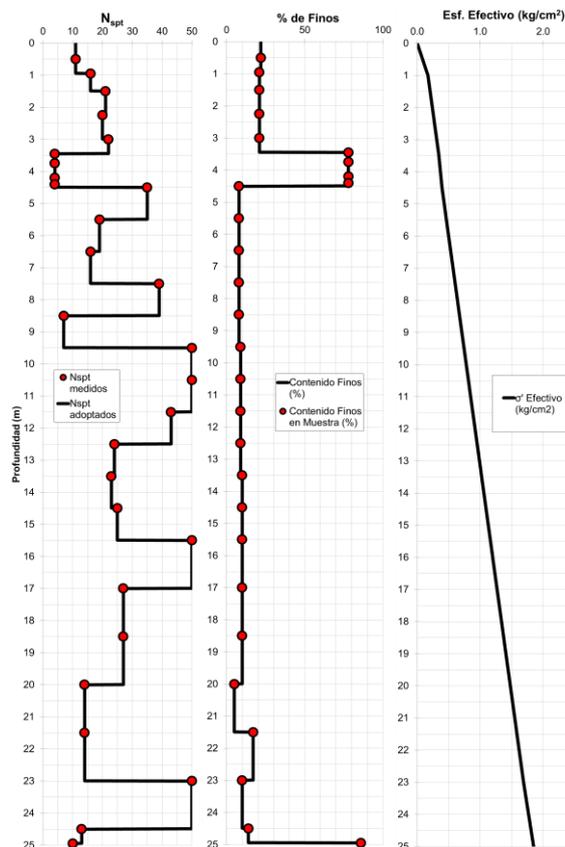
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-21

PARÁMETROS DE ENTRADA:

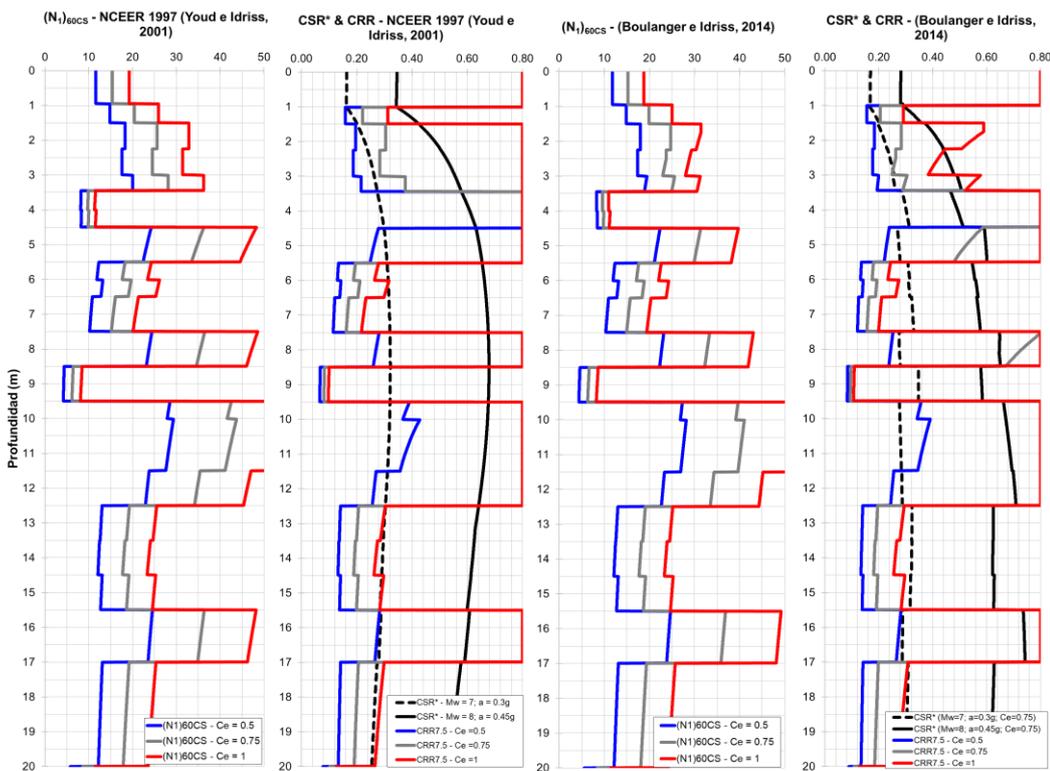
Sondaje	: SPT-21
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

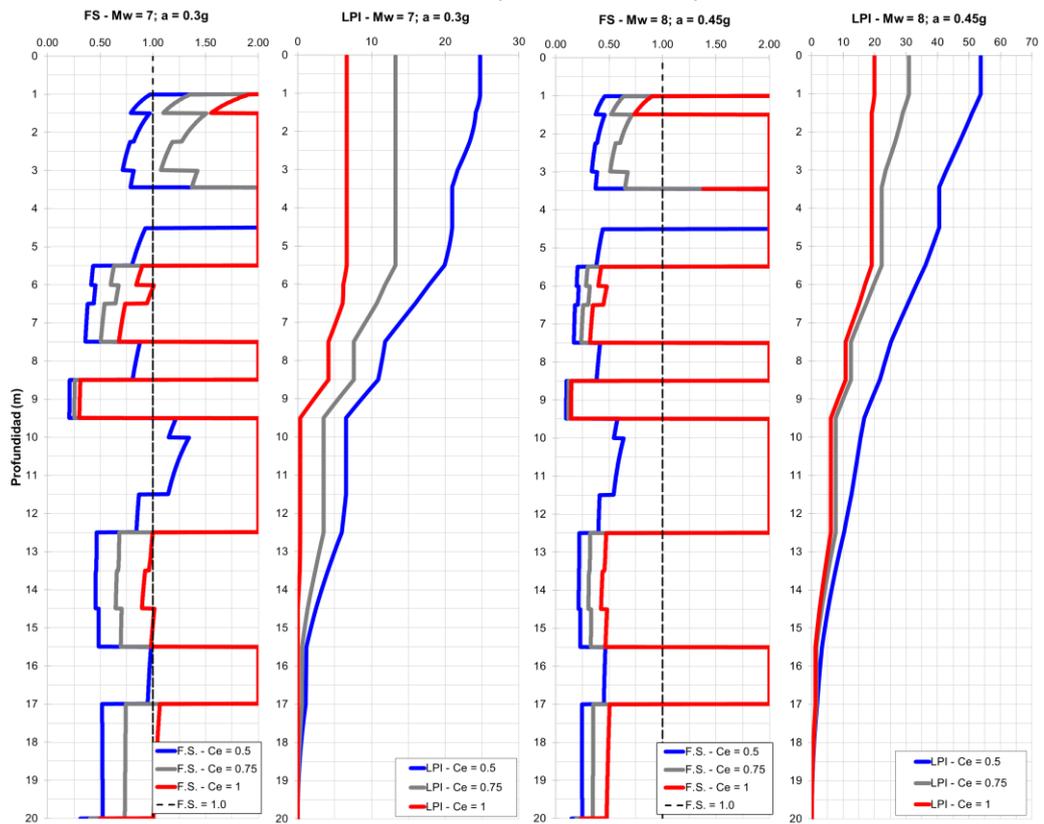
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	24.7	Efectos severos
		0.8	13.3	Probables efectos severos
		1	6.6	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	27.9	Efectos severos
		0.8	14.7	Probables efectos severos
		1	8.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	53.7	Efectos severos
		0.8	30.9	Efectos severos
		1	19.9	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	52.0	Efectos severos
		0.8	30.8	Efectos severos
		1	20.6	Efectos severos



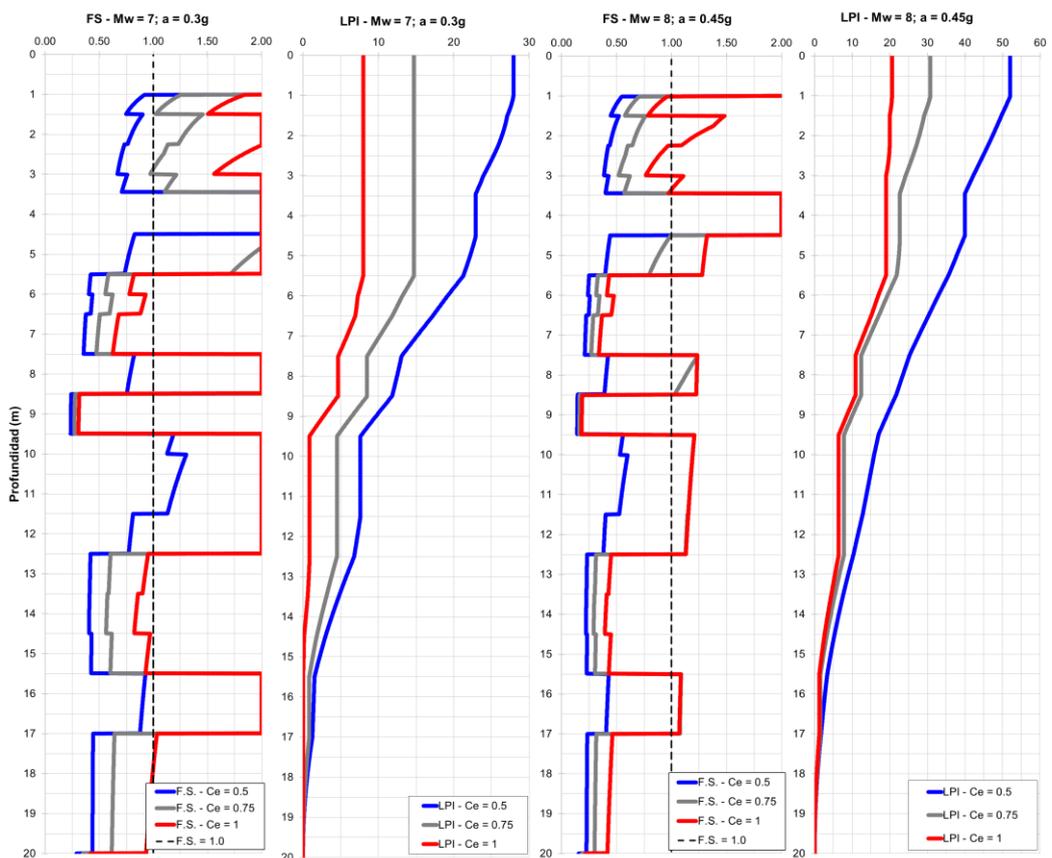
DETERMINACIÓN DEL $(N_1)_{60CS}$ Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



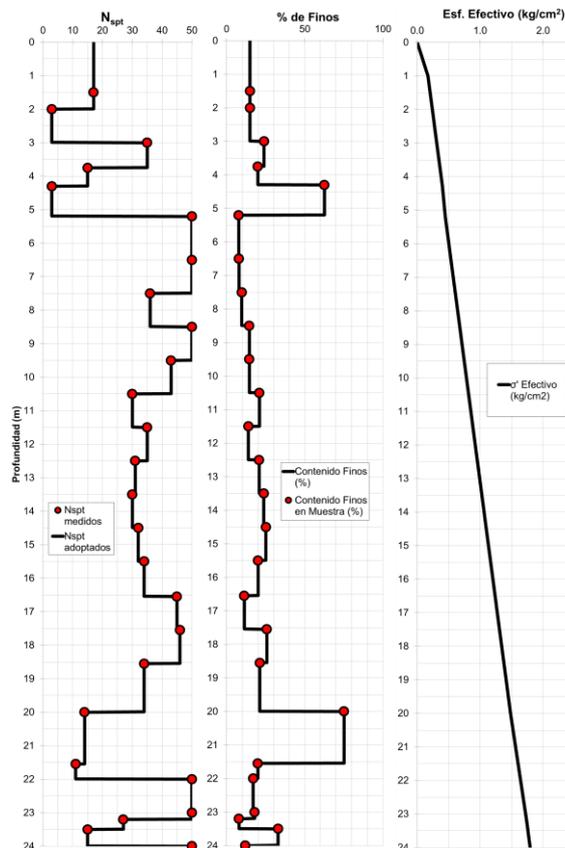
EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN – SPT-22

PARÁMETROS DE ENTRADA:

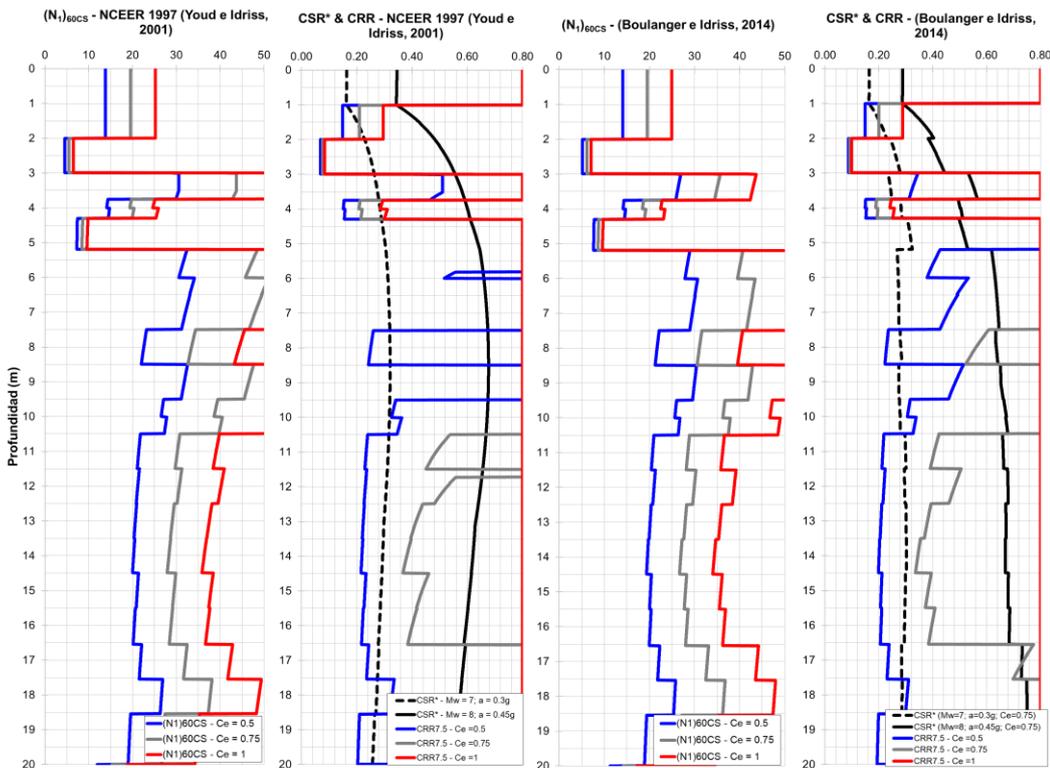
Sondaje	: SPT-22
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo SPT	
Tipo de Martillo	: Dona
Diámetro de perforación:	: 90 - 100 mm
Método de Muestreo (Cs):	: Estandar

RESUMEN DE RESULTADOS:

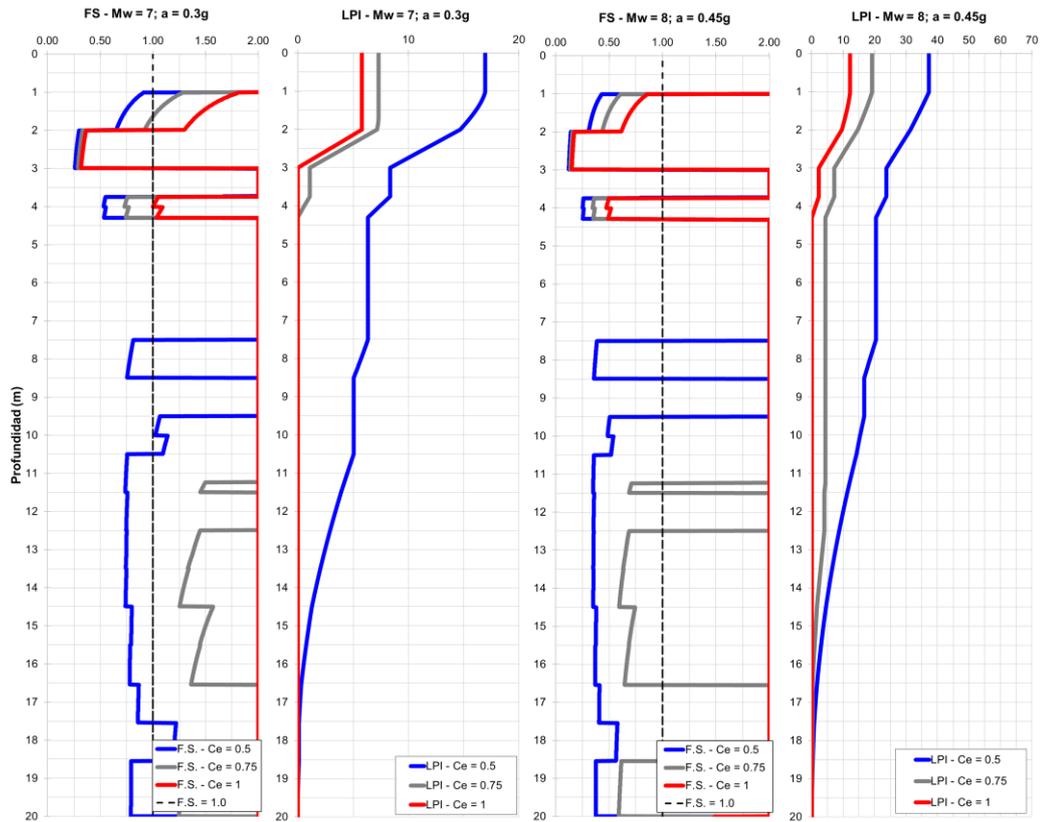
ESCENARIO	MÉTODO	Ce	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	16.9	Efectos severos
		0.8	7.3	Probables efectos severos
		1	5.8	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	19.1	Efectos severos
		0.8	7.4	Probables efectos severos
		1	5.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	NCEER 1997 (Youd e Idriss, 2001)	0.5	37.2	Efectos severos
		0.8	19.2	Efectos severos
		1	12.2	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	0.5	43.8	Efectos severos
		0.8	22.2	Efectos severos
		1	10.9	Probables efectos severos



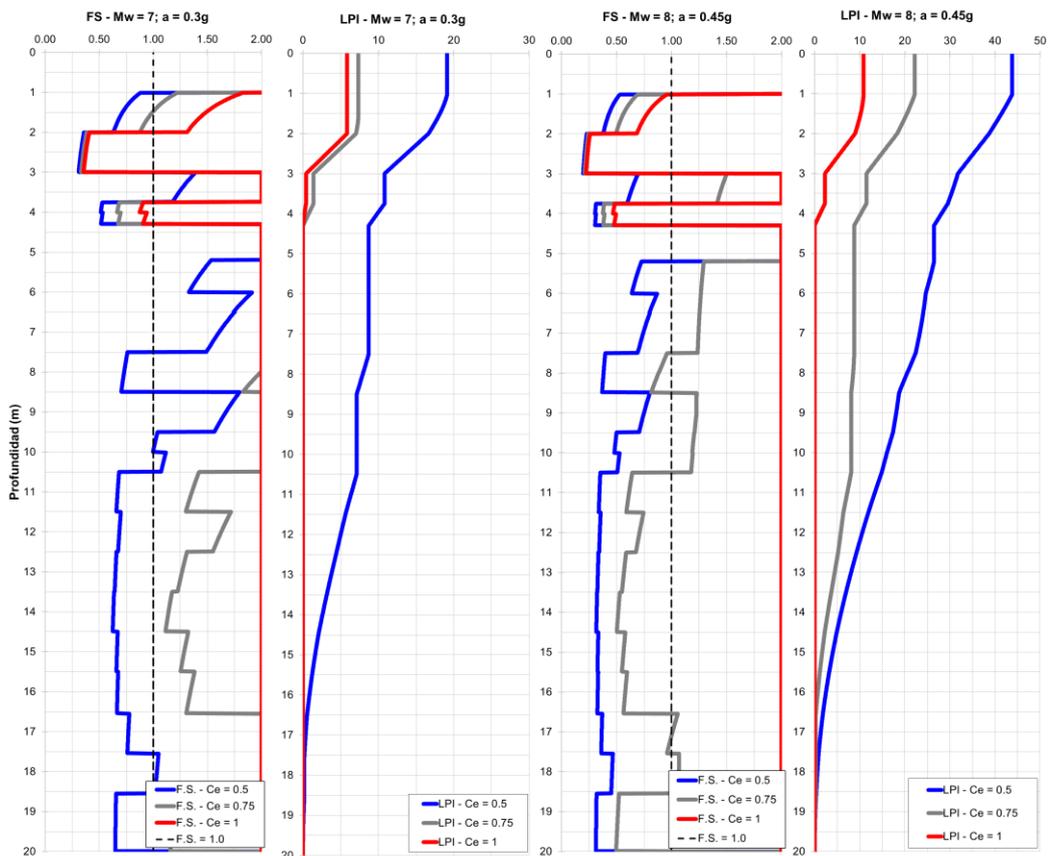
DETERMINACIÓN DEL (N₁)_{60CS} Y ESTIMACIÓN DEL CRR Y CSR*:



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN EL NCEER 1997 (YOU D E IDRIS S, 2001):



ESTIMACIÓN DEL FS Y DEL LPI SEGÚN BOULANGER E IDRIS S (2014):



ANEXO B

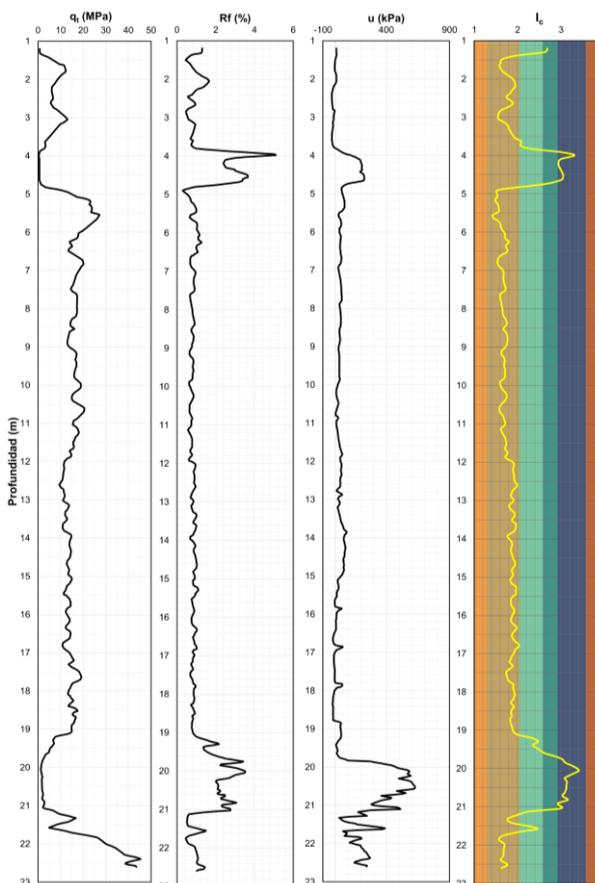
Análisis del potencial de licuación empleando ensayos CPT_u

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 01

DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-01
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

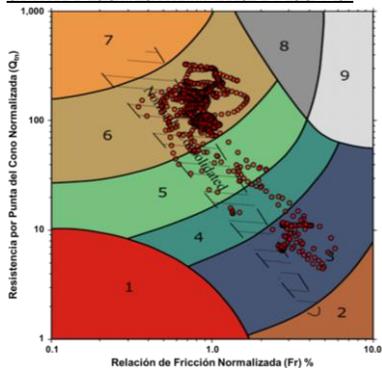
DATA DEL ENSAYO CPTu:



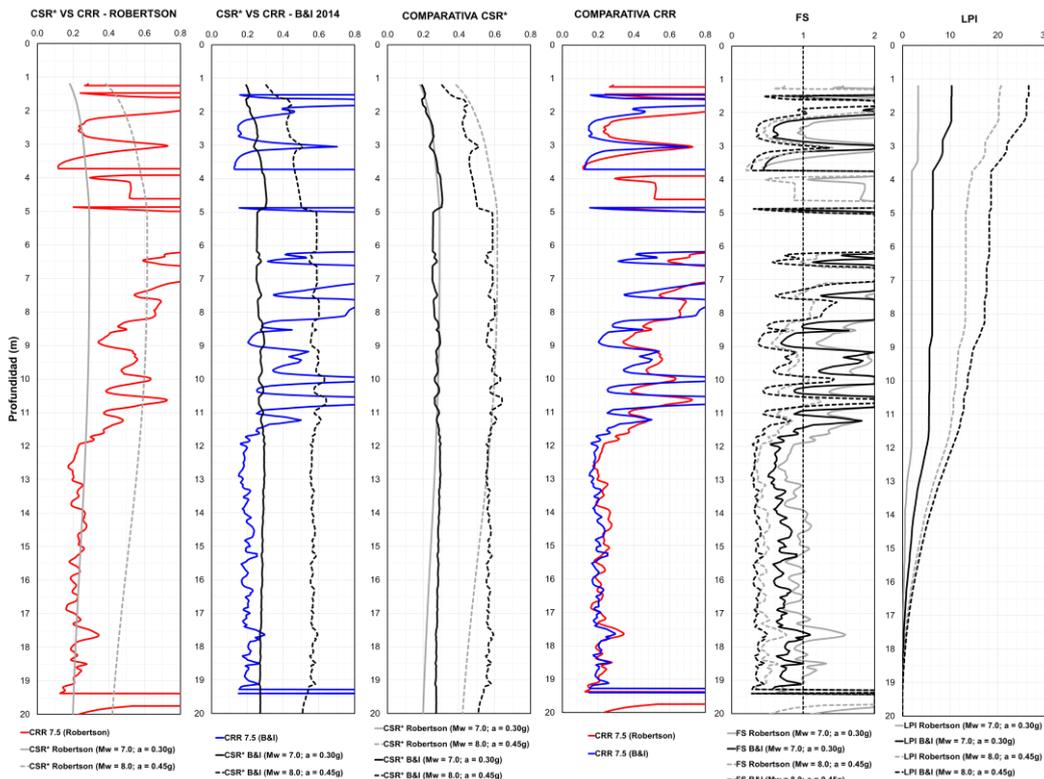
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.3	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	10.3	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	20.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	26.5	Efectos severos

CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 02

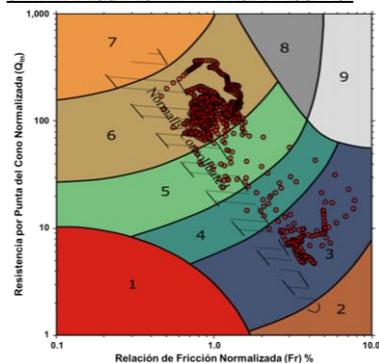
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-02
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

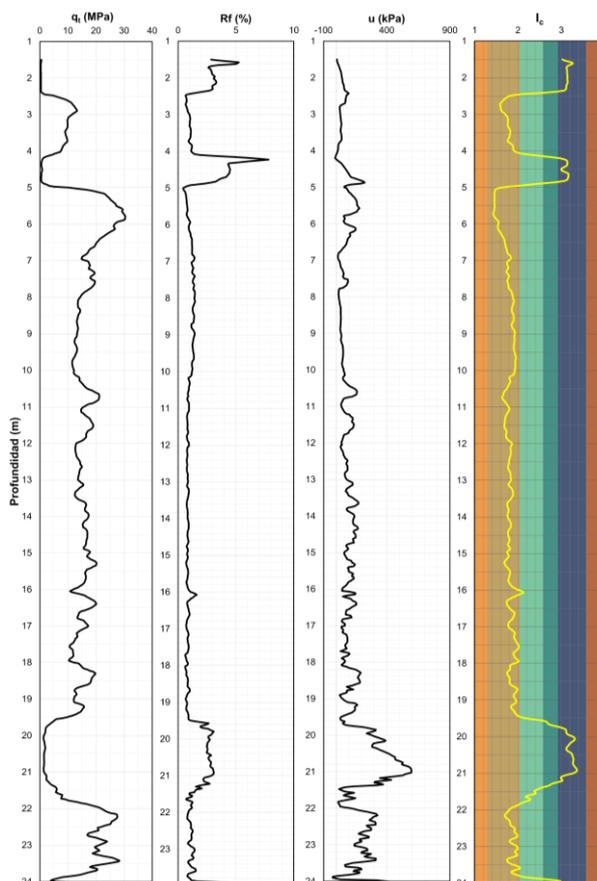
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	0.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	5.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	15.9	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	21.5	Efectos severos

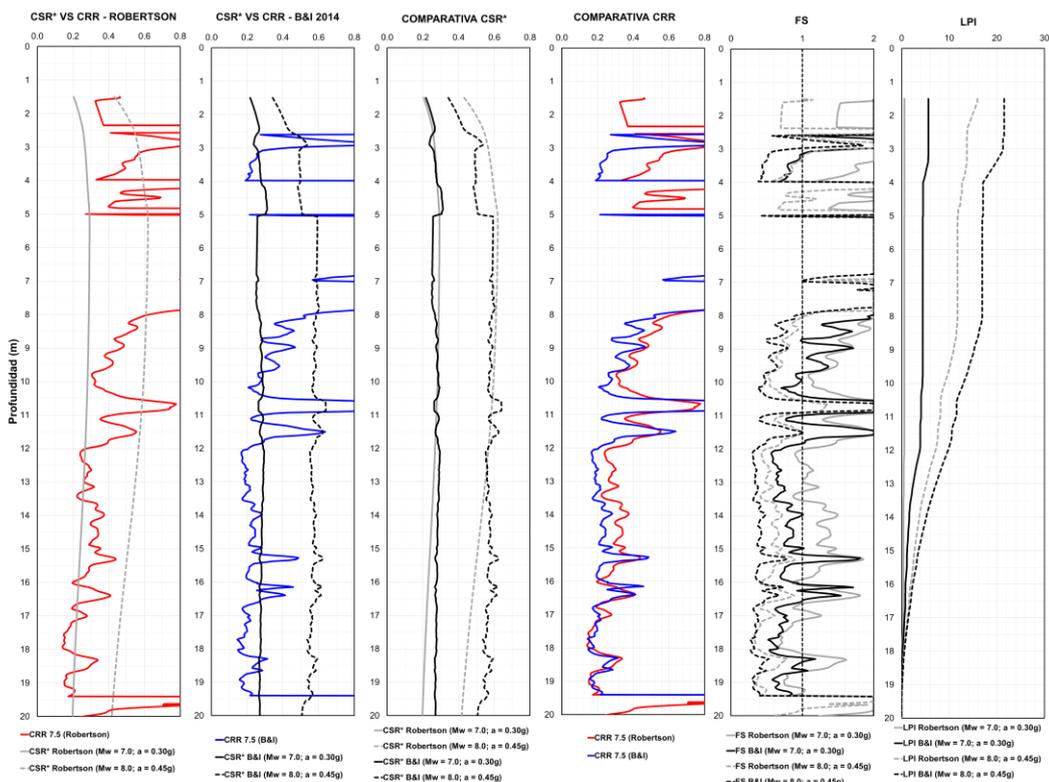
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 03

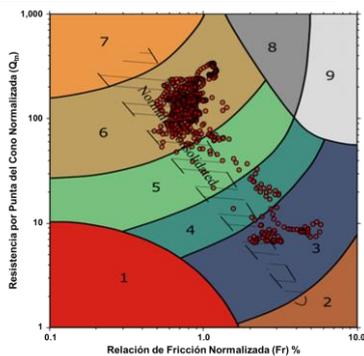
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-03
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

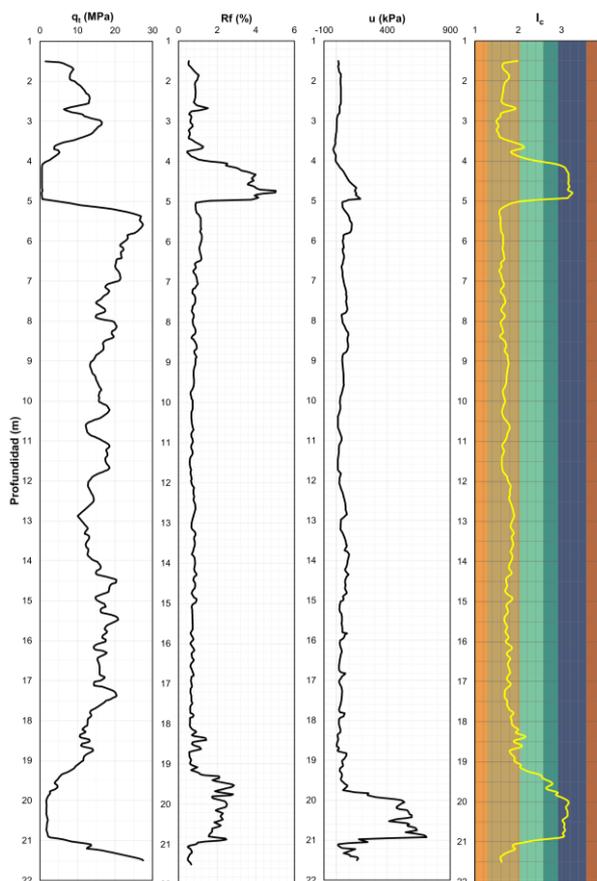
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	2.3	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	8.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	17.6	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	23.4	Efectos severos

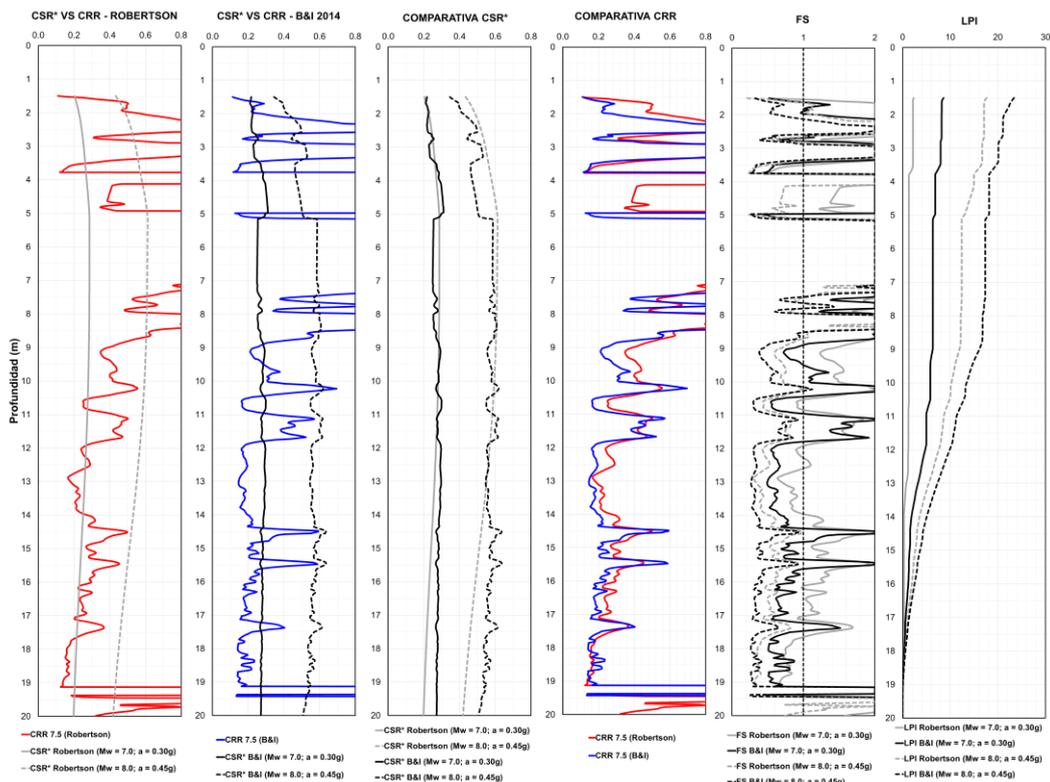
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 04

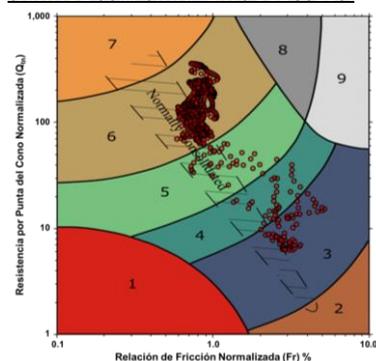
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-04
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

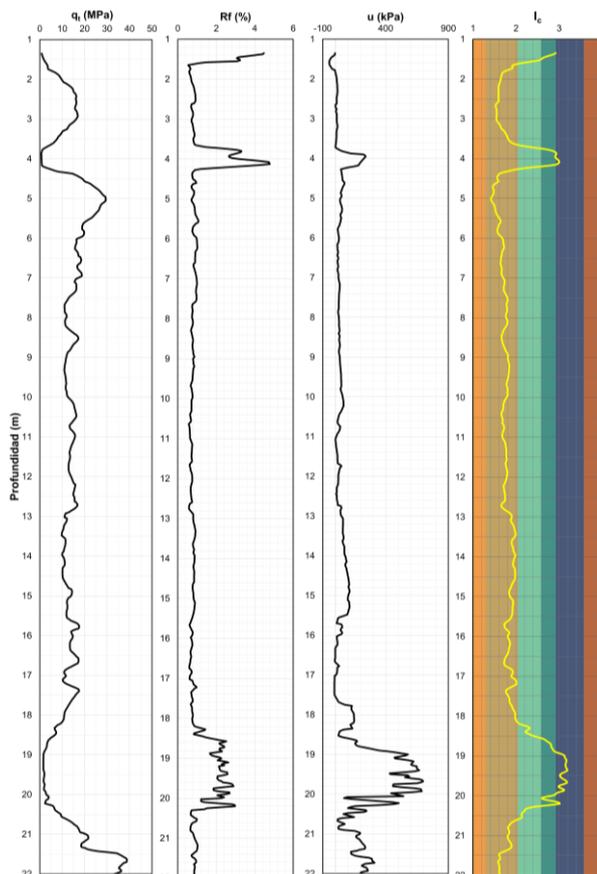
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	13.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	21.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	28.2	Efectos severos

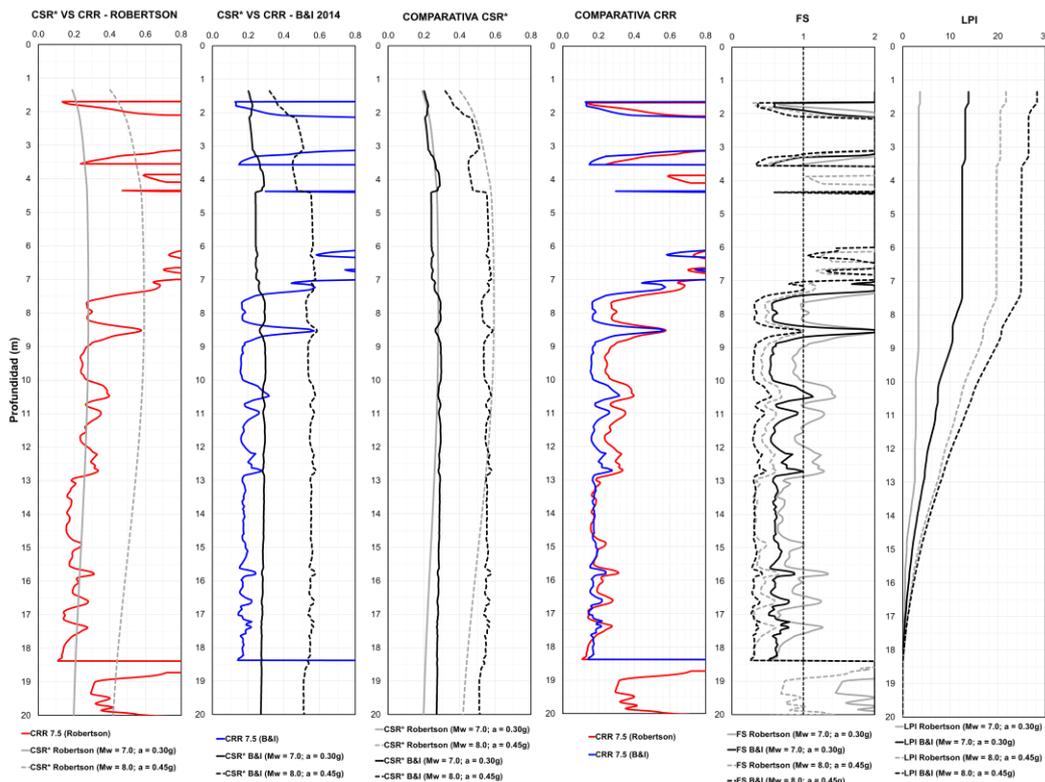
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:

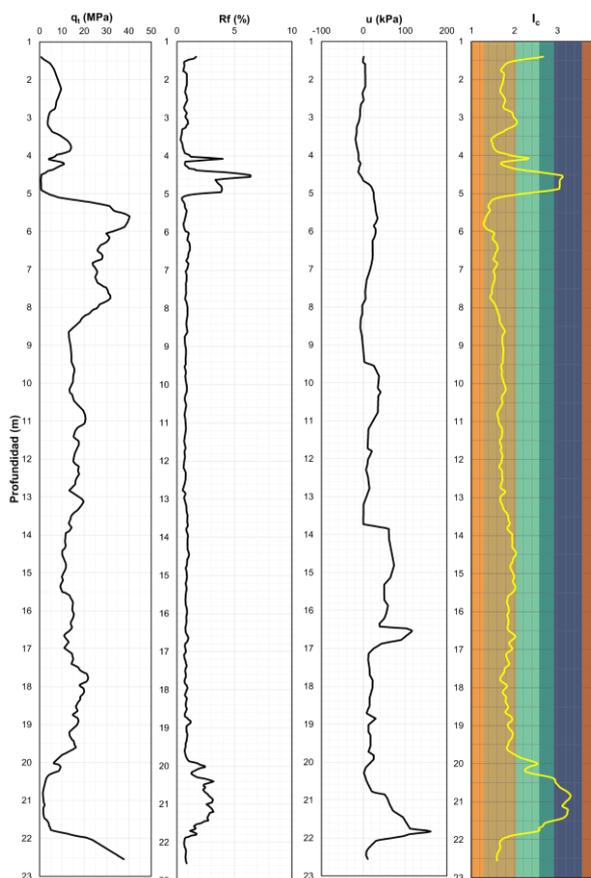


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 05

DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-05
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

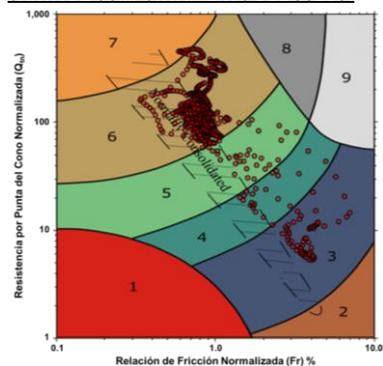
DATA DEL ENSAYO CPTu:



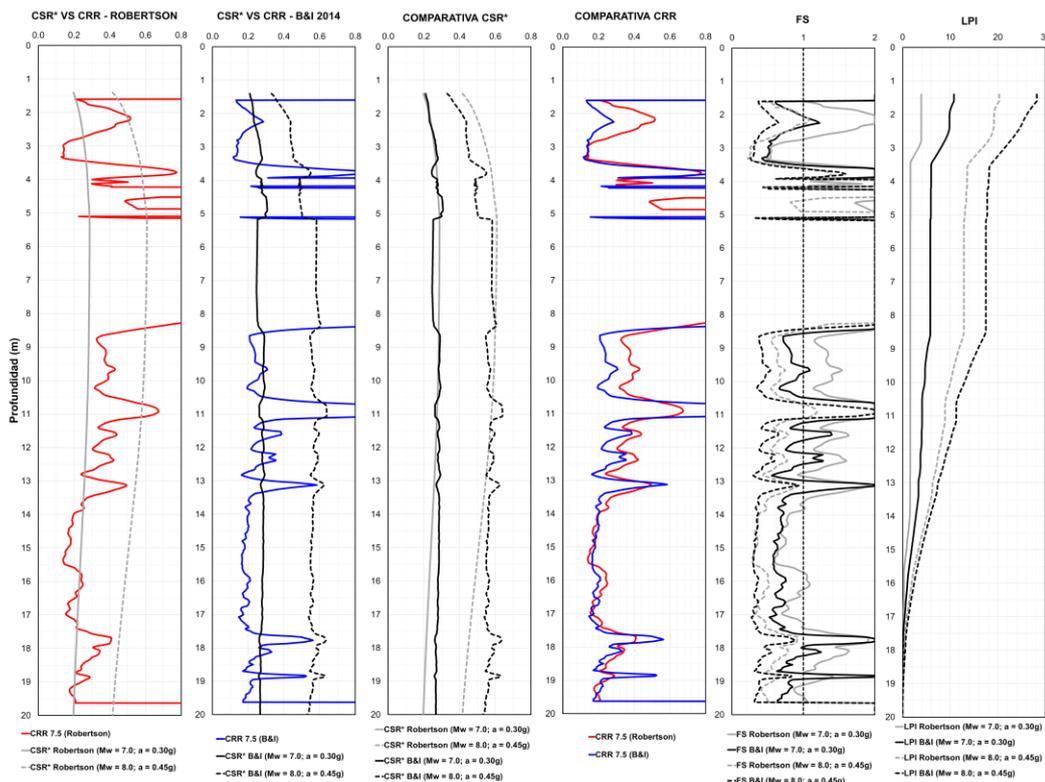
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.9	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	10.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	20.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	28.2	Efectos severos

CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 06

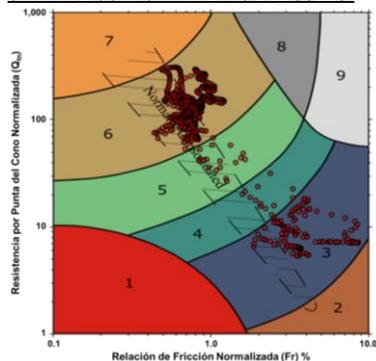
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-06
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

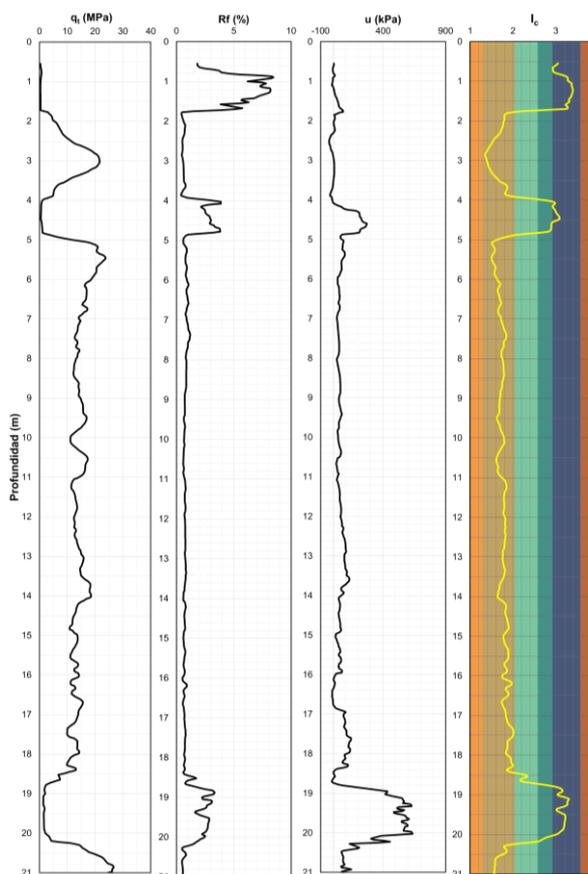
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	13.7	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	24.2	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	31.0	Efectos severos

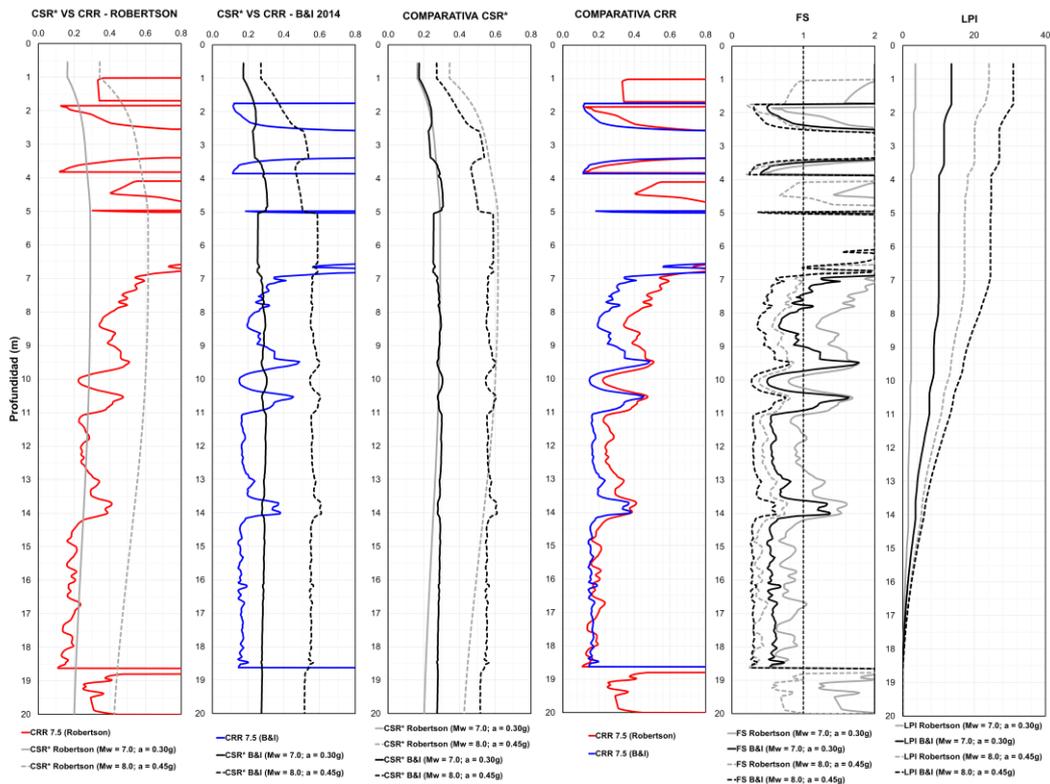
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 07

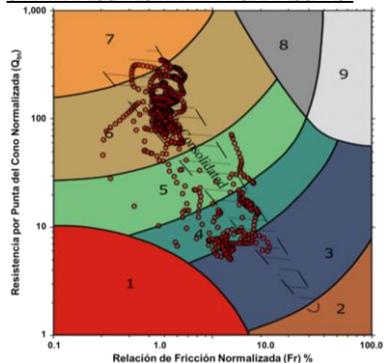
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-07
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

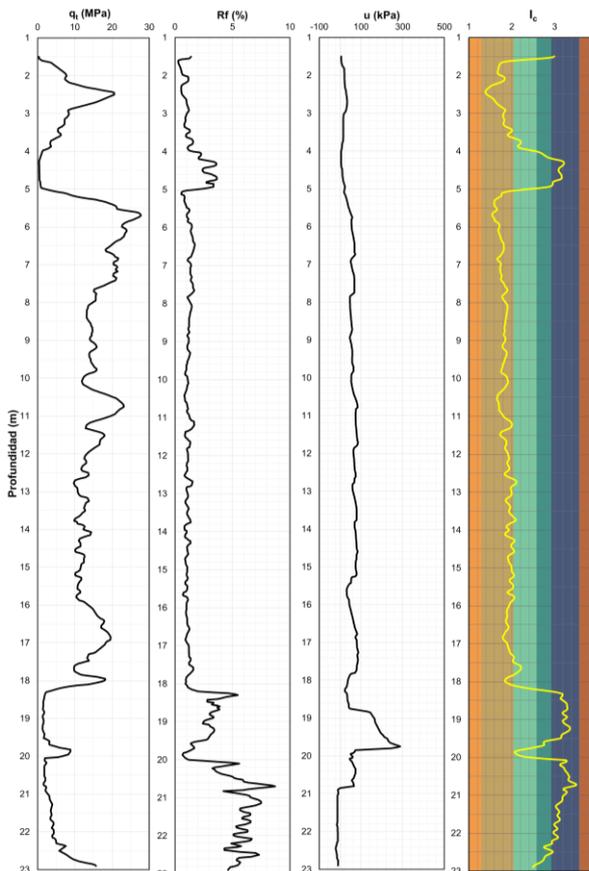
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.1	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	7.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	19.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	23.9	Efectos severos

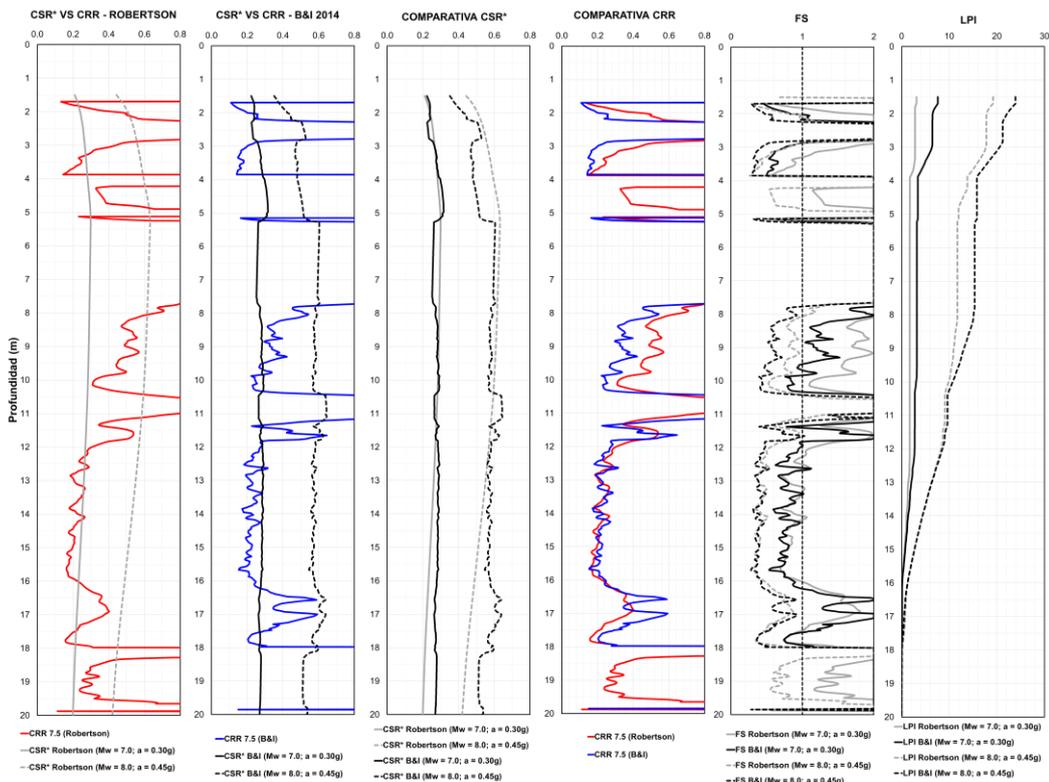
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 08

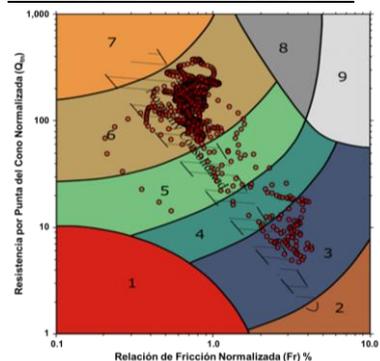
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-08
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

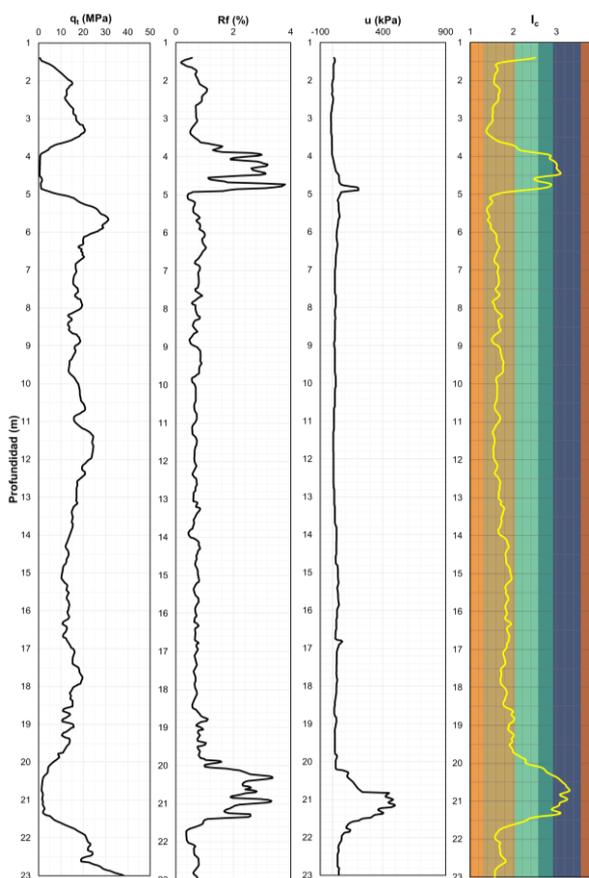
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	2.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	6.4	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	14.0	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	16.6	Efectos severos

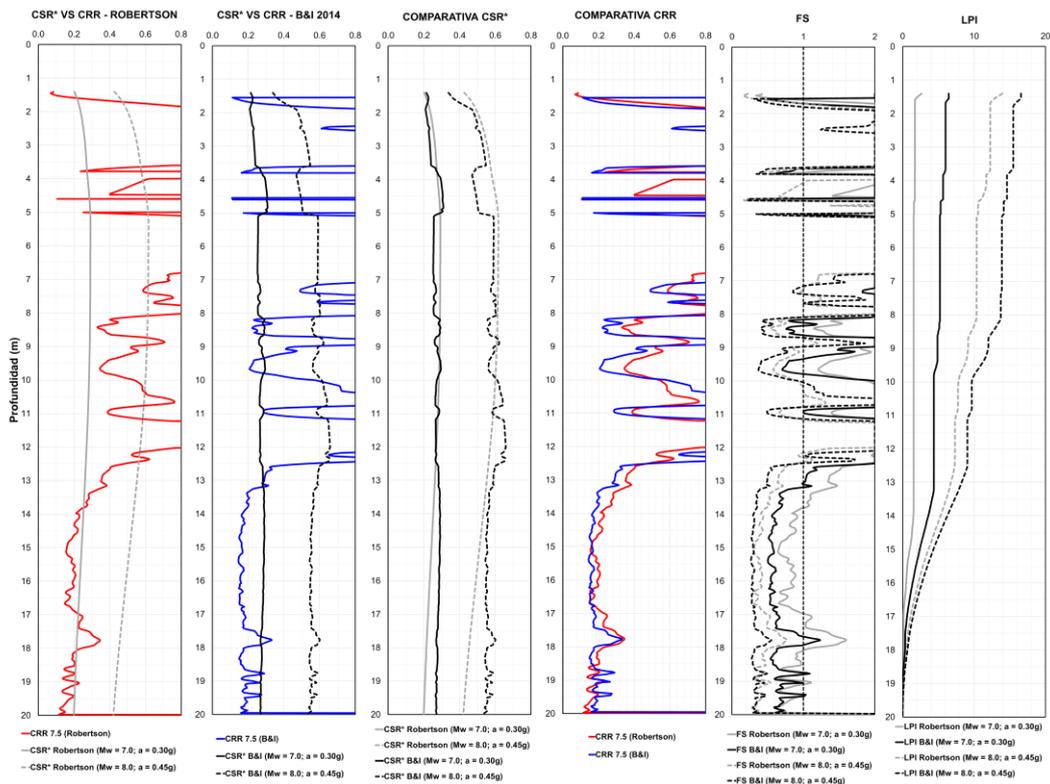
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:

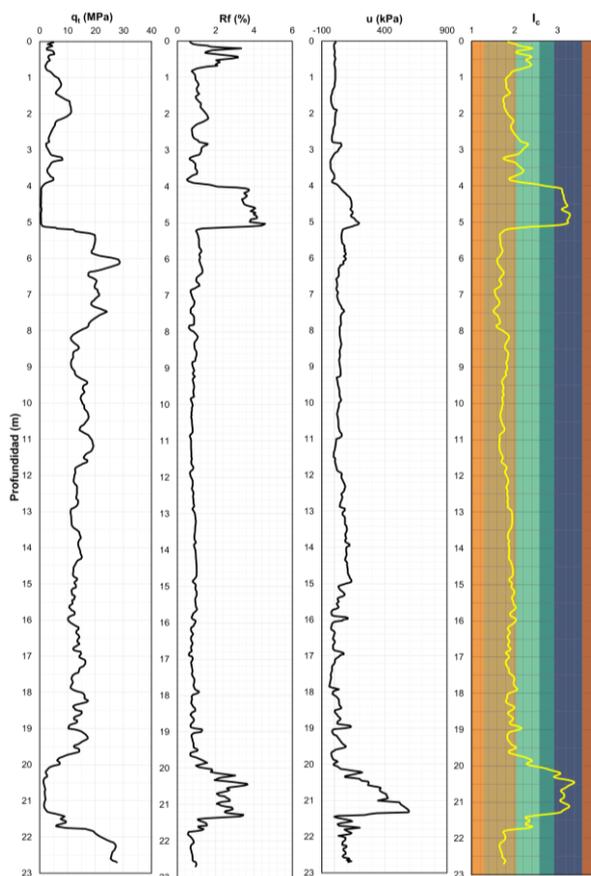


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 09

DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-09
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

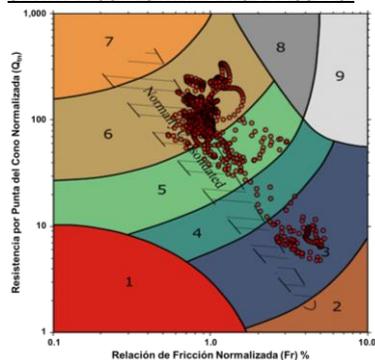
DATA DEL ENSAYO CPTu:



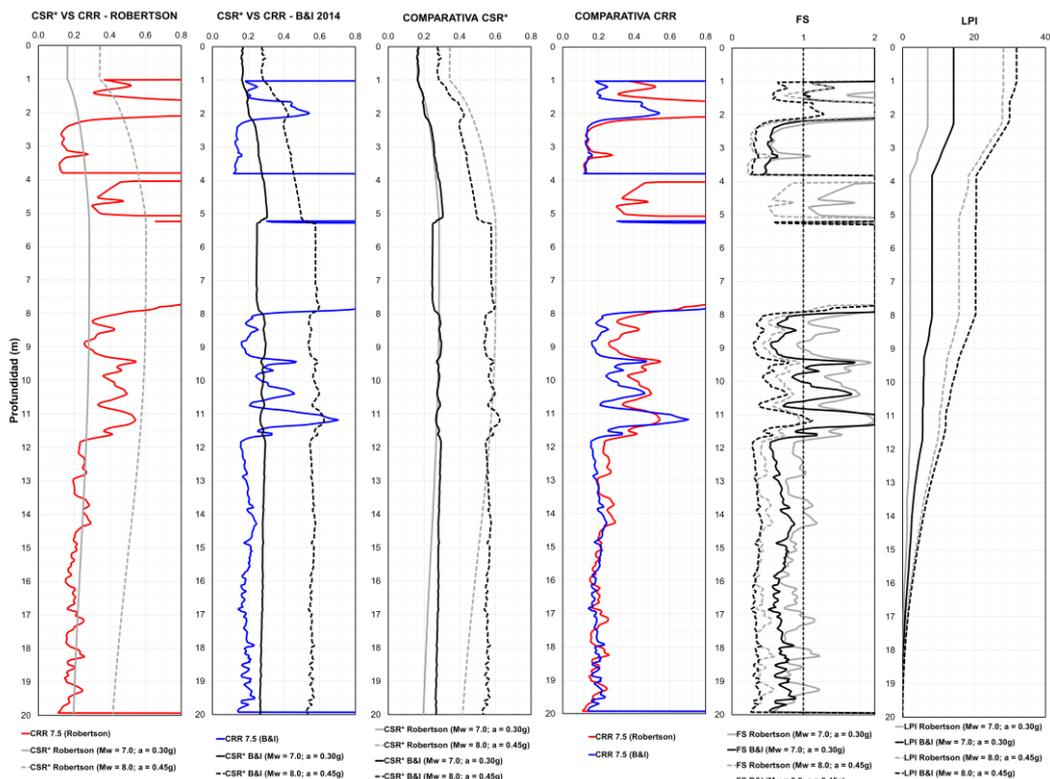
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	7.0	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	14.3	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	28.2	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	31.9	Efectos severos

CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 10

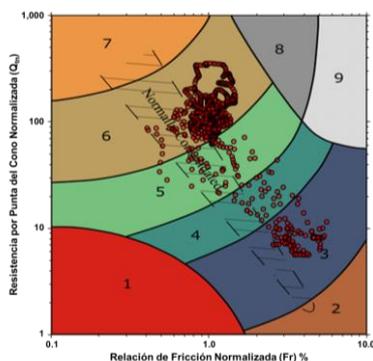
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-10
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

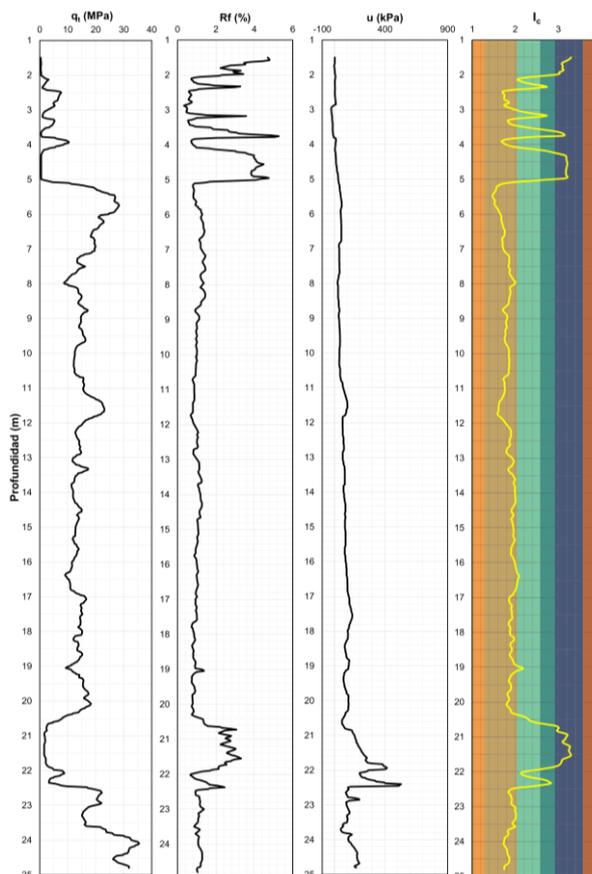
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	1.8	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	6.8	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	19.9	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	22.7	Efectos severos

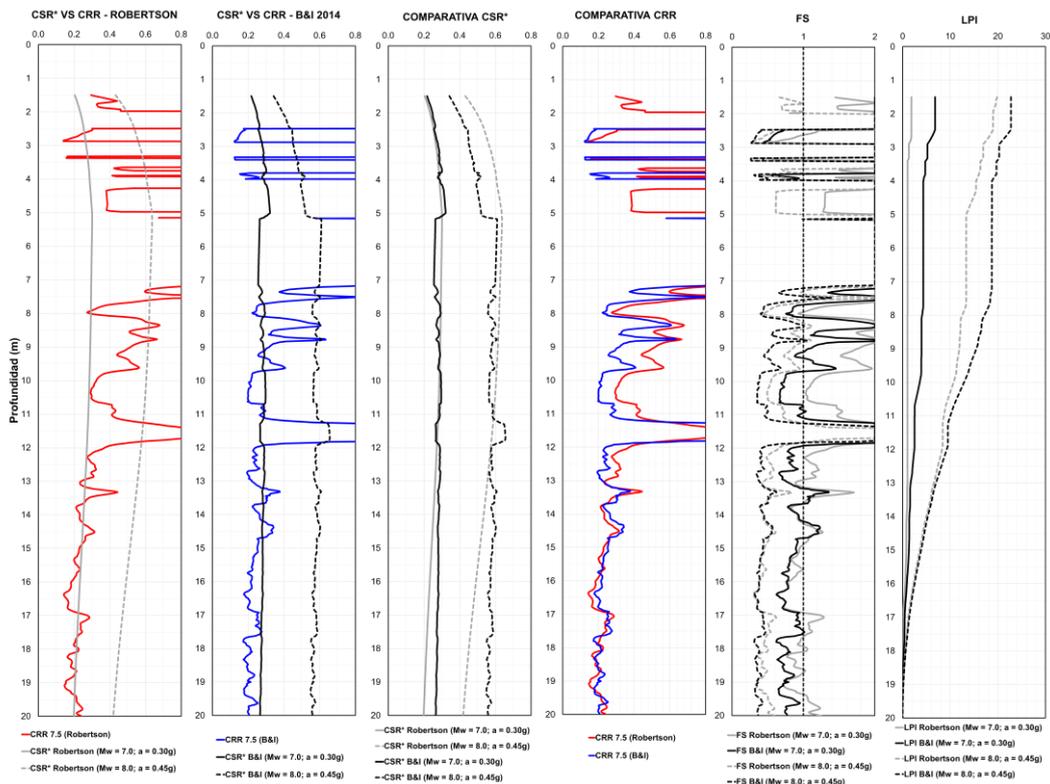
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:

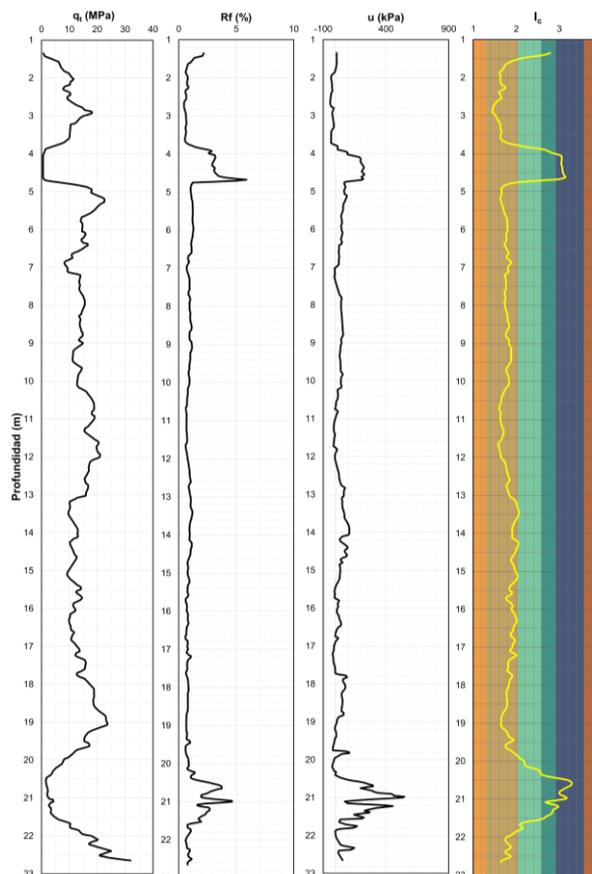


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 11

DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-11
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

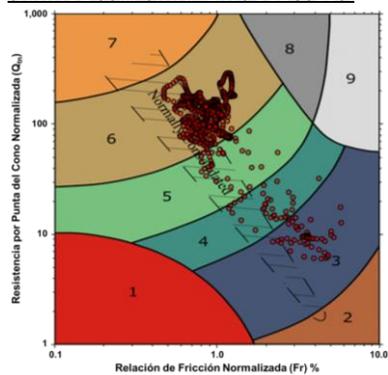
DATA DEL ENSAYO CPTu:



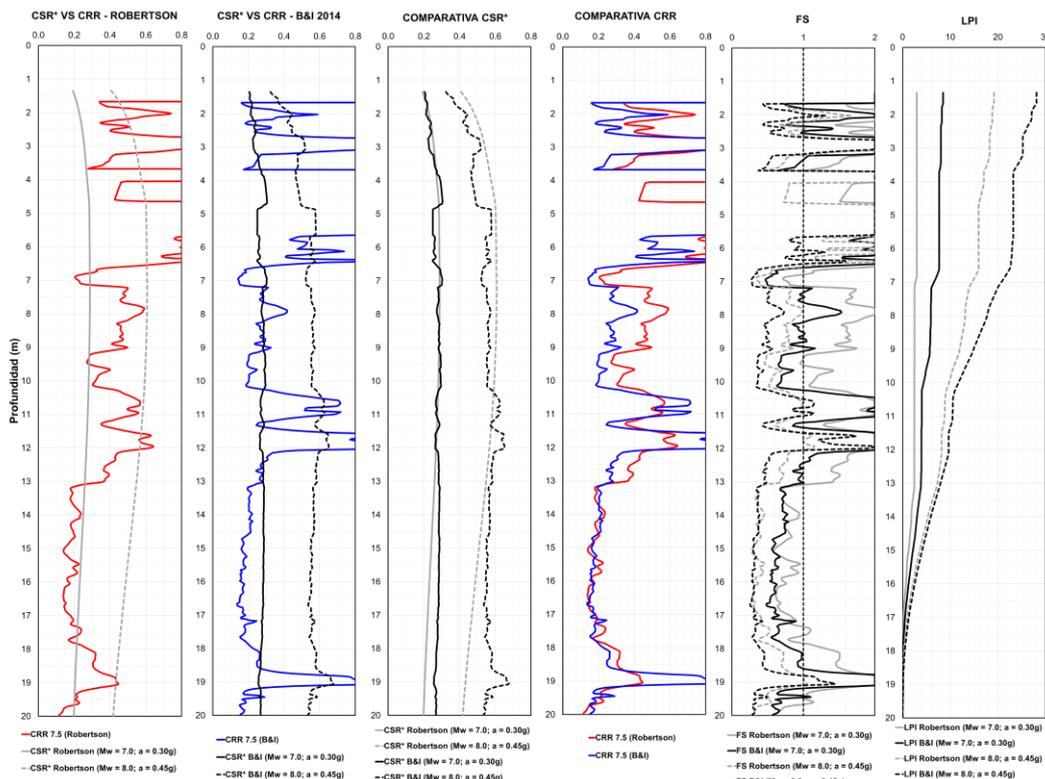
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.0	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	8.5	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	19.2	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	28.1	Efectos severos

CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 12

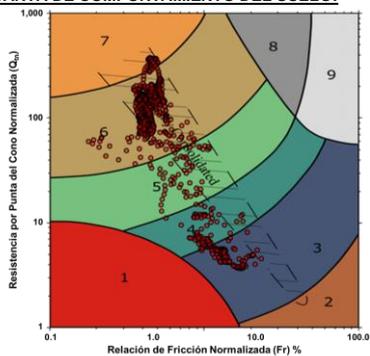
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-12
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

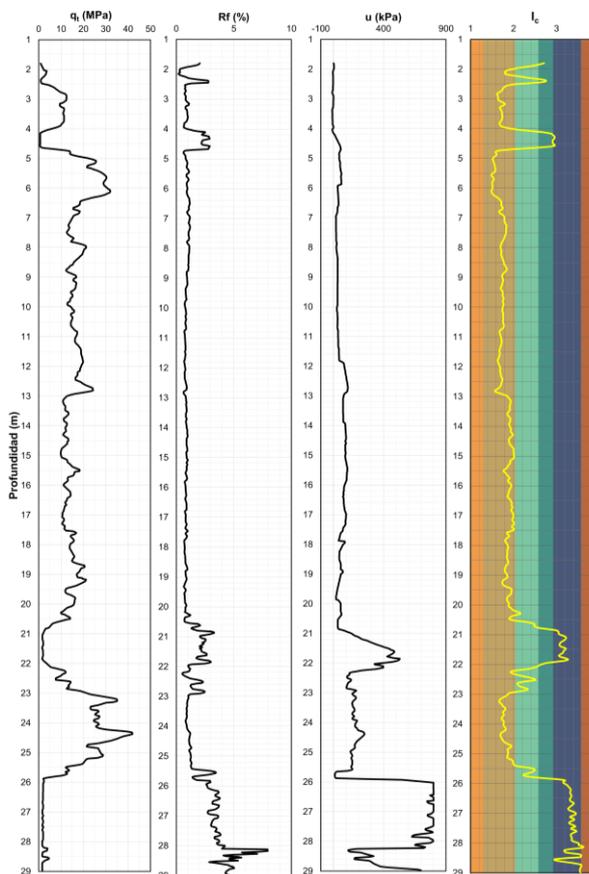
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	2.3	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	6.1	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	13.9	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	22.2	Efectos severos

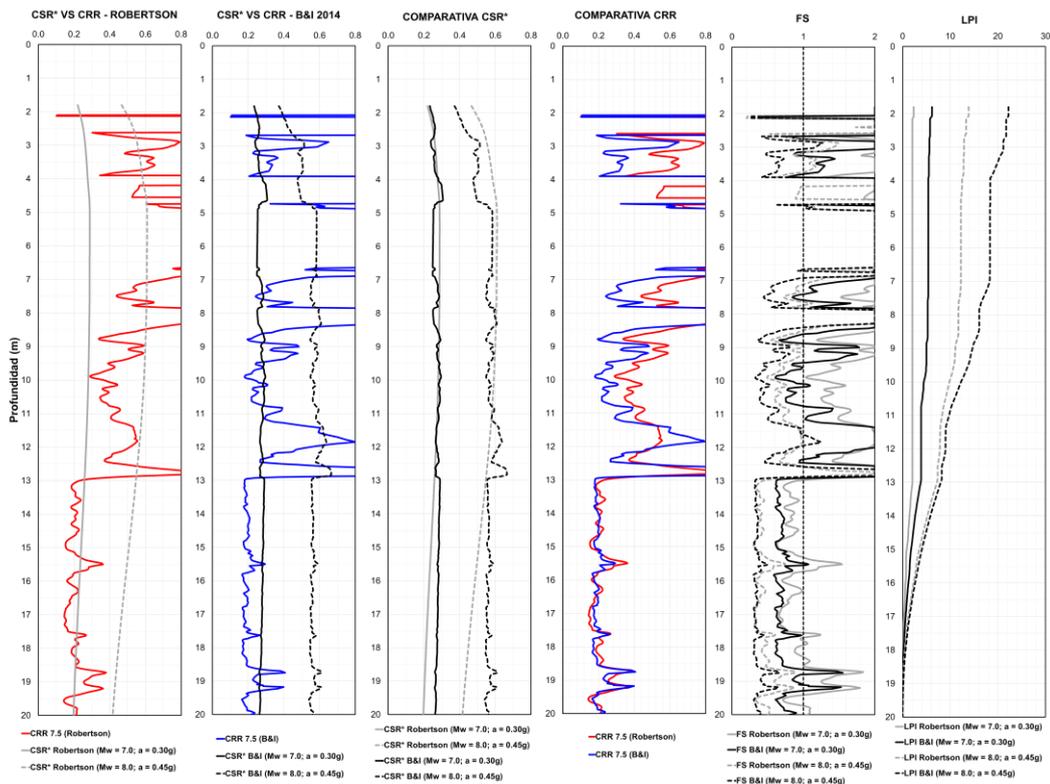
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:

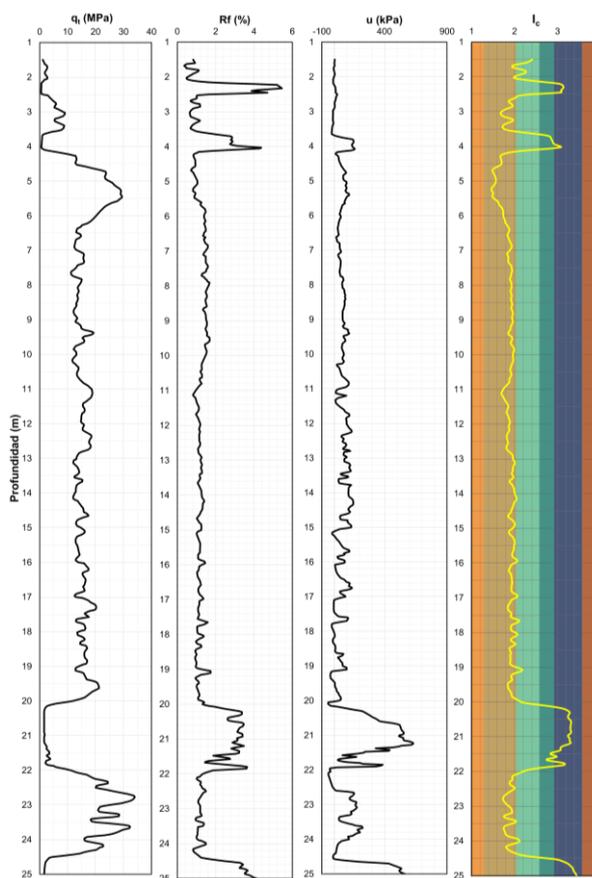


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 13

DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-13
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

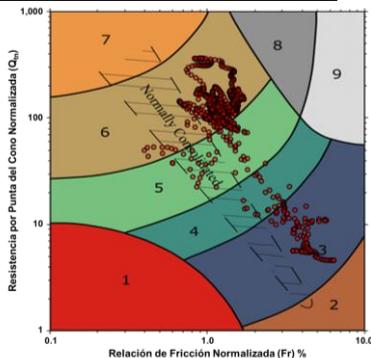
DATA DEL ENSAYO CPTu:



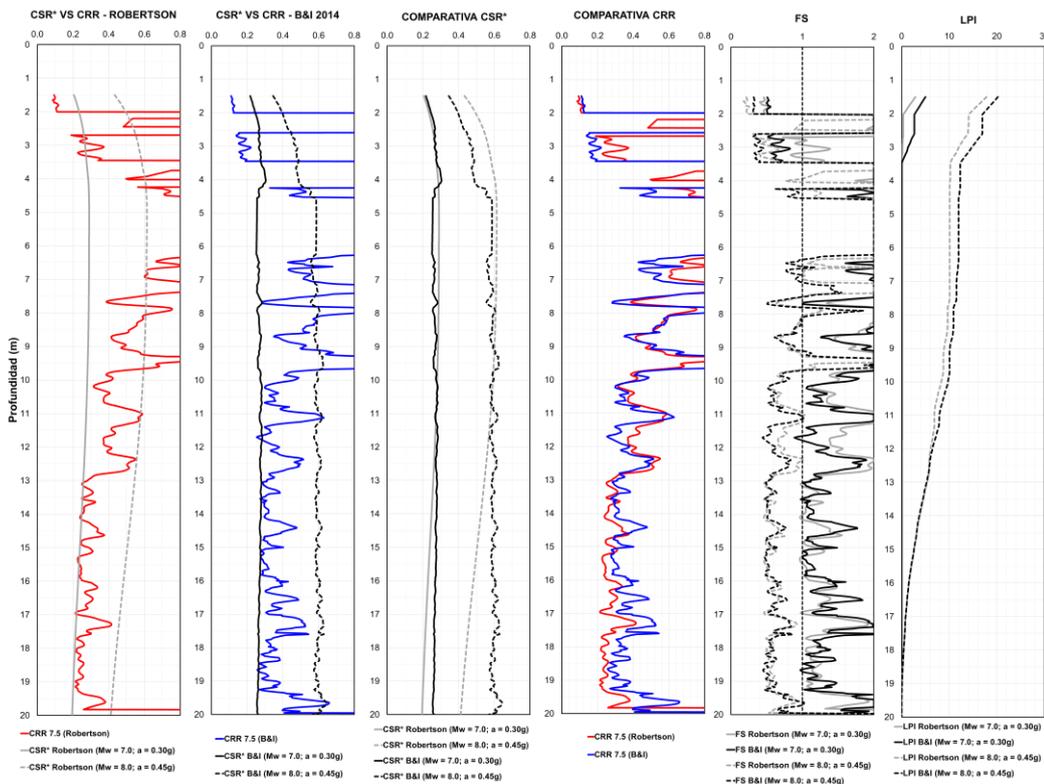
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	2.9	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	5.0	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	17.8	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	20.2	Efectos severos

CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 14

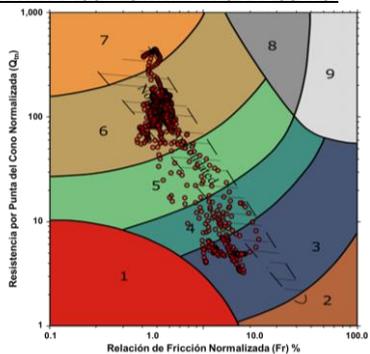
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-14
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

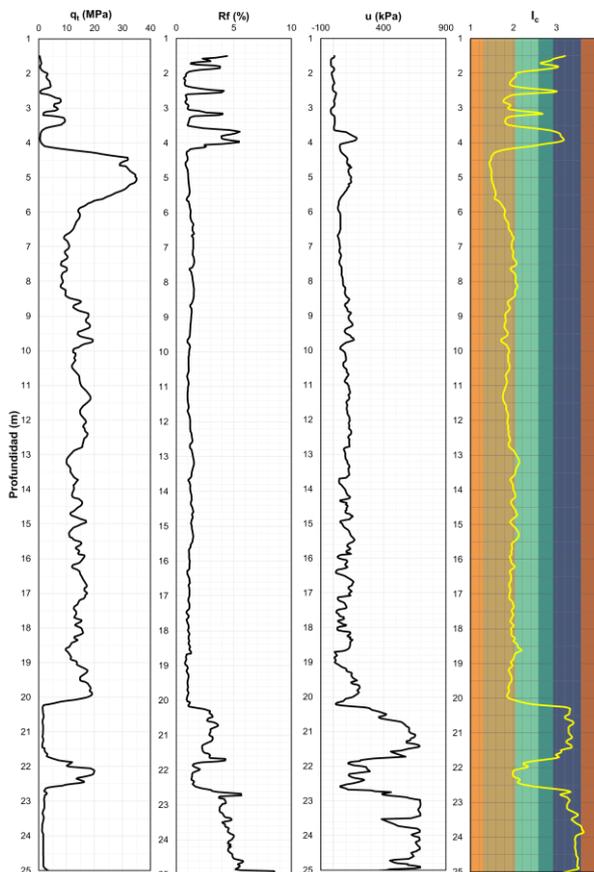
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	2.1	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	4.7	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	20.1	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	23.4	Efectos severos

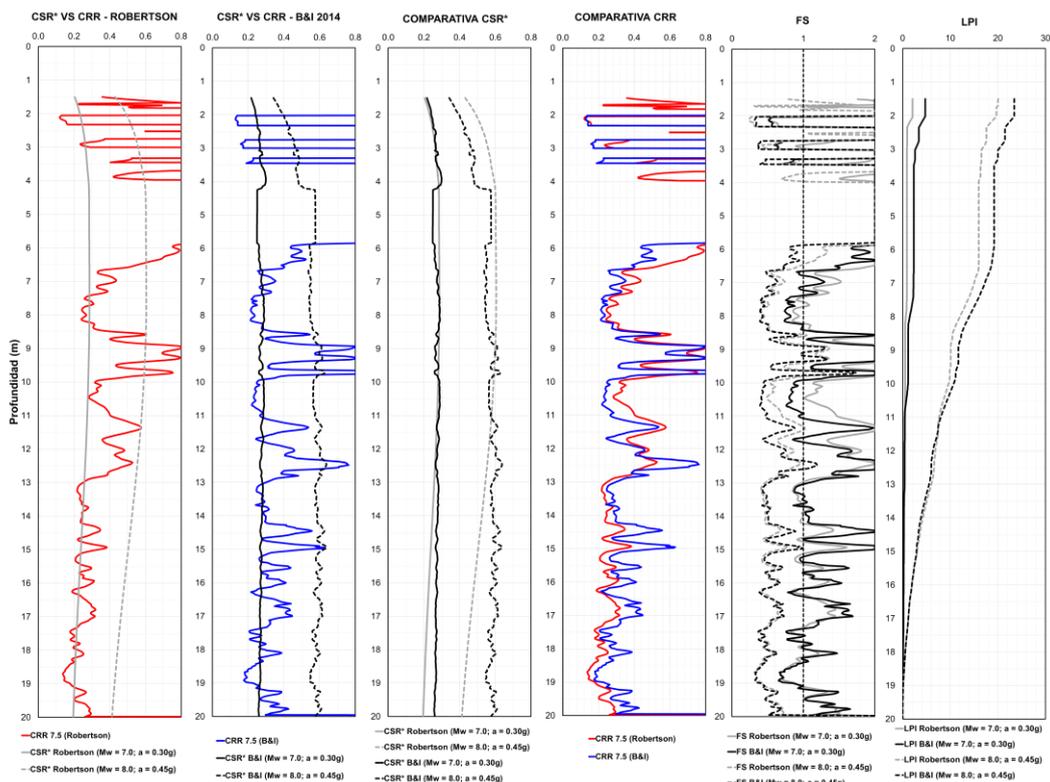
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 15

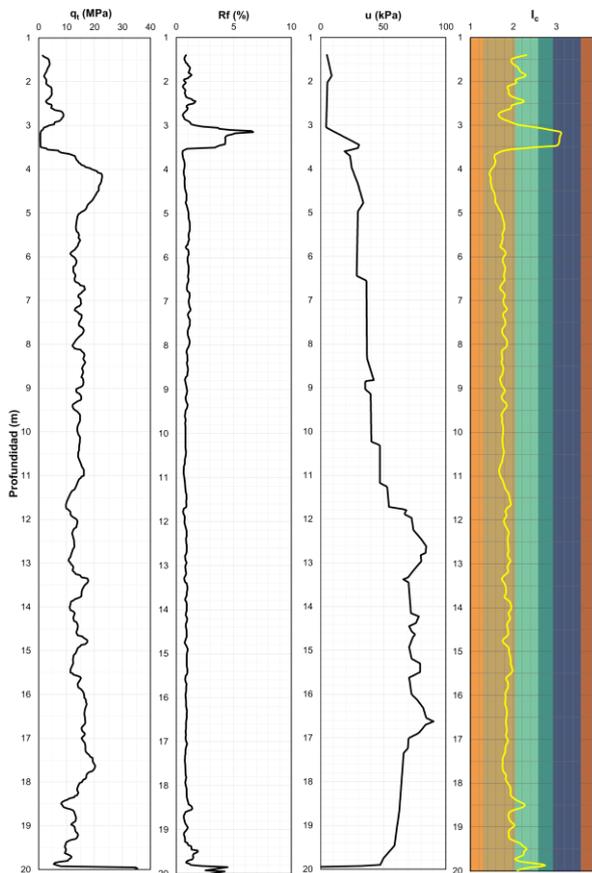
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-15
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

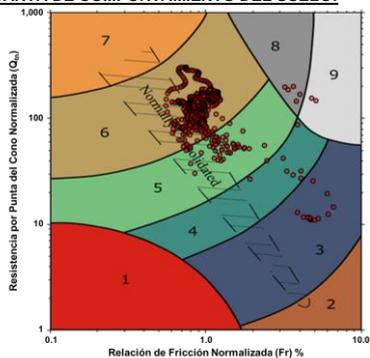
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	5.7	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	13.7	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	25.0	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	36.0	Efectos severos

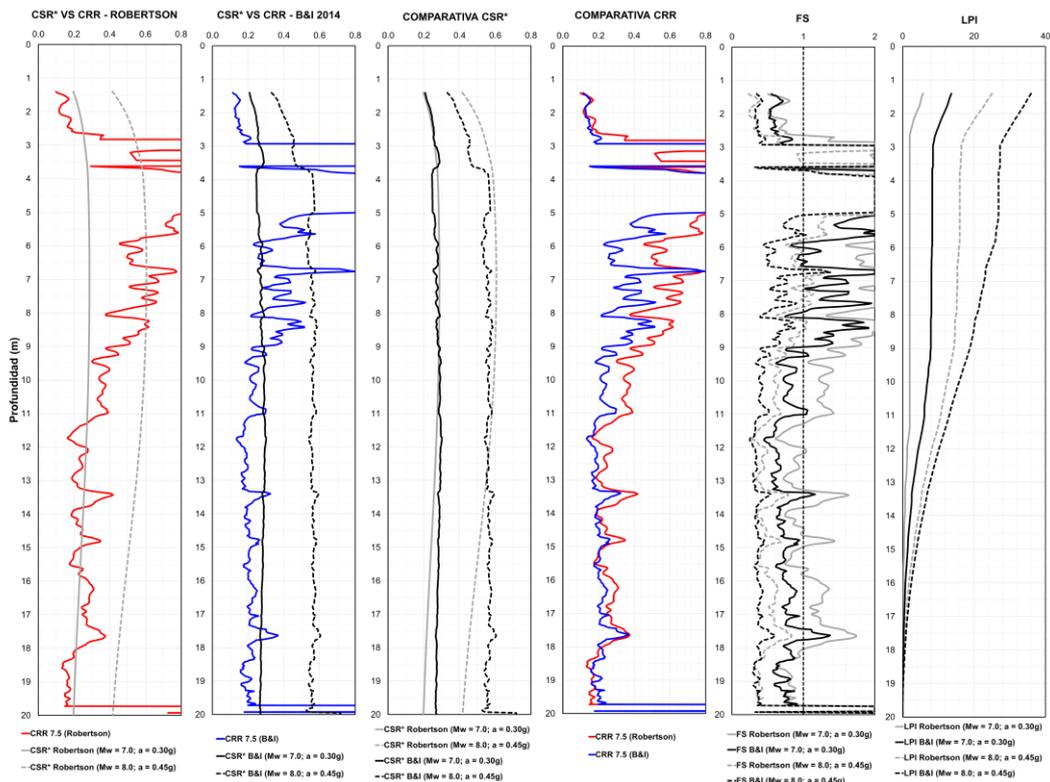
DATA DEL ENSAYO CPTu:



CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 16

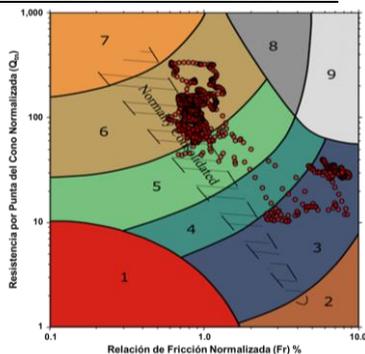
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-16
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

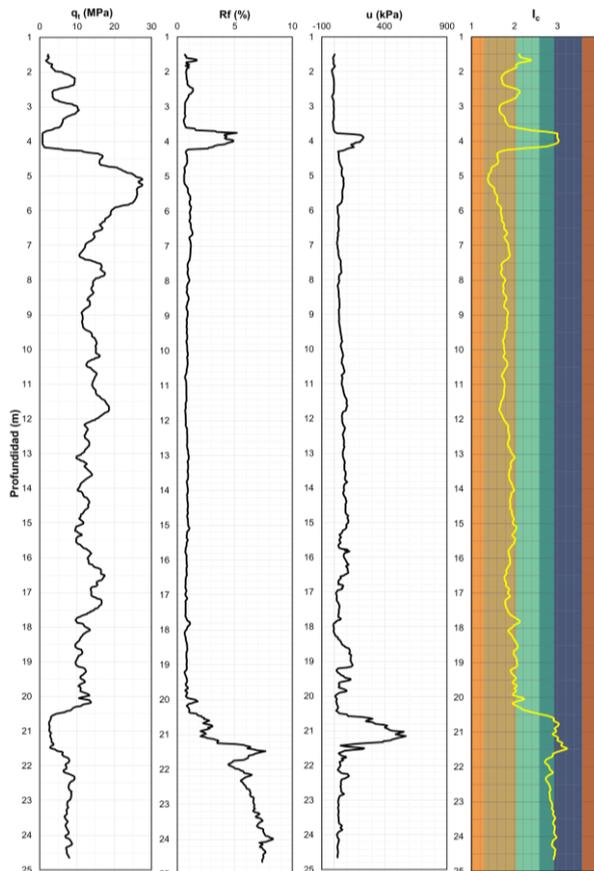
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	6.2	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	15.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	26.4	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	35.3	Efectos severos

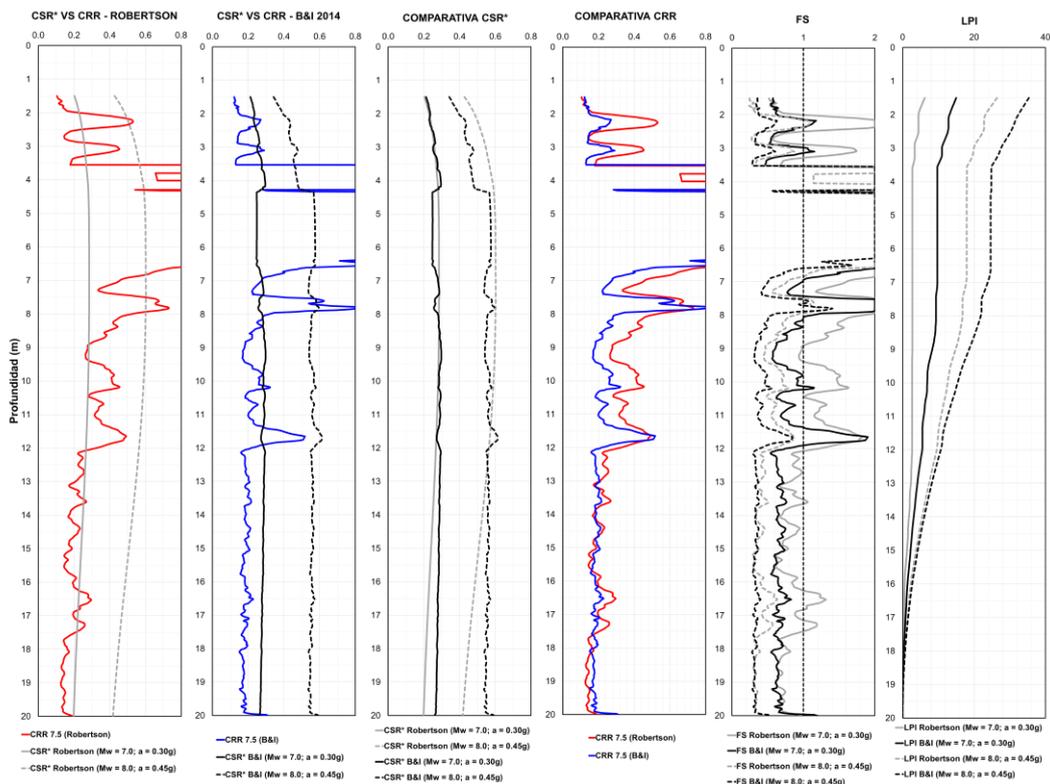
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 17

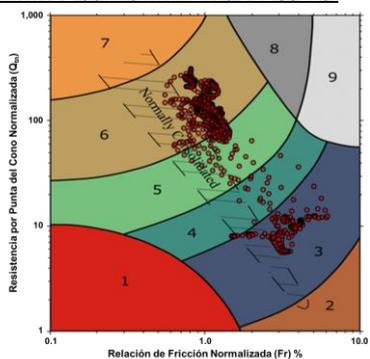
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-17
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

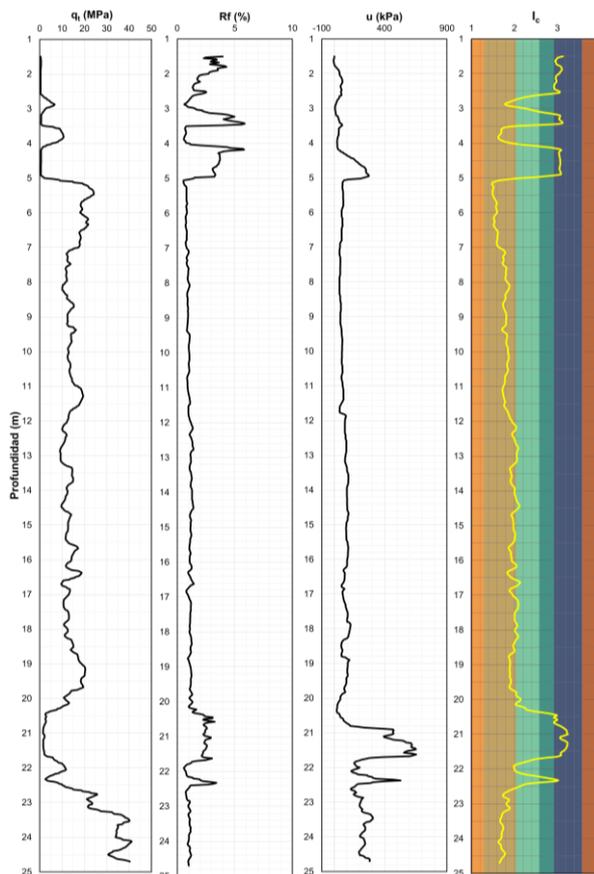
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	1.5	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	6.9	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	20.8	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	24.0	Efectos severos

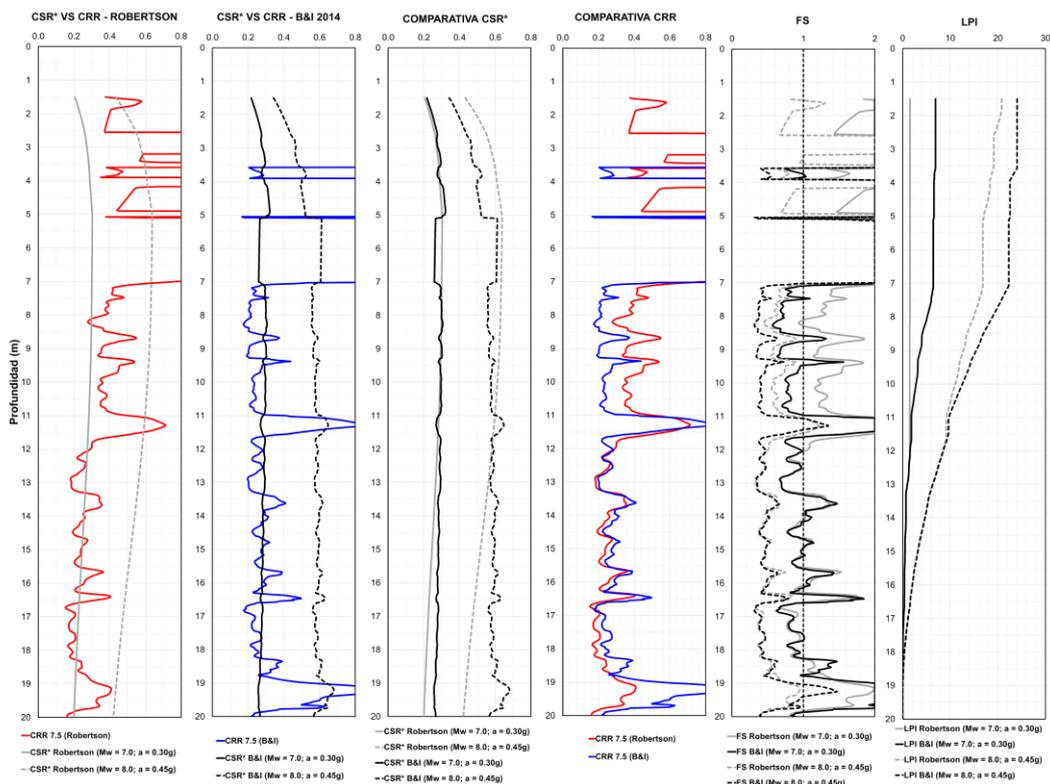
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 18

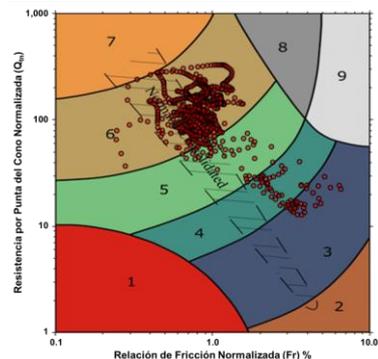
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-18
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

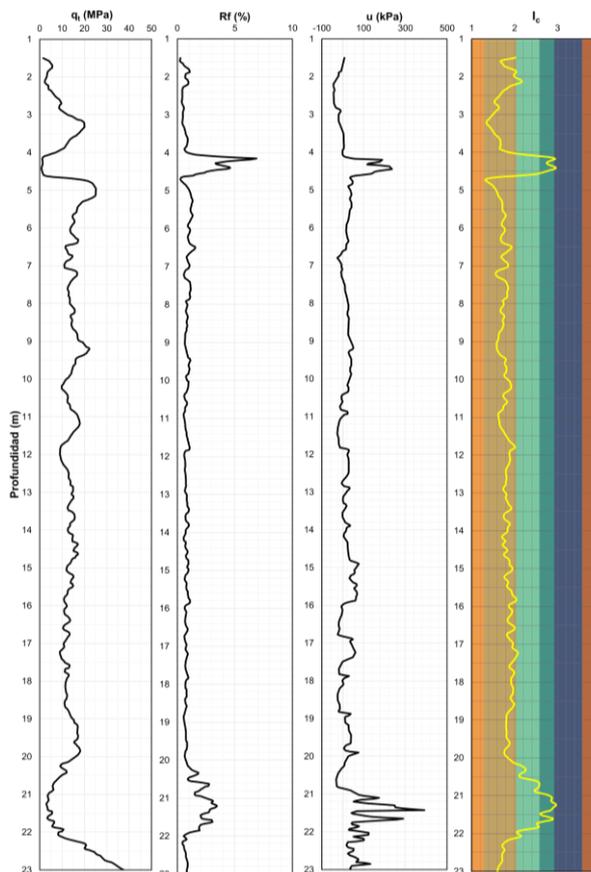
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	6.2	Probables efectos severos
	Boulangier e Idriss (2014)	14.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	24.7	Efectos severos
	Boulangier e Idriss (2014)	32.8	Efectos severos

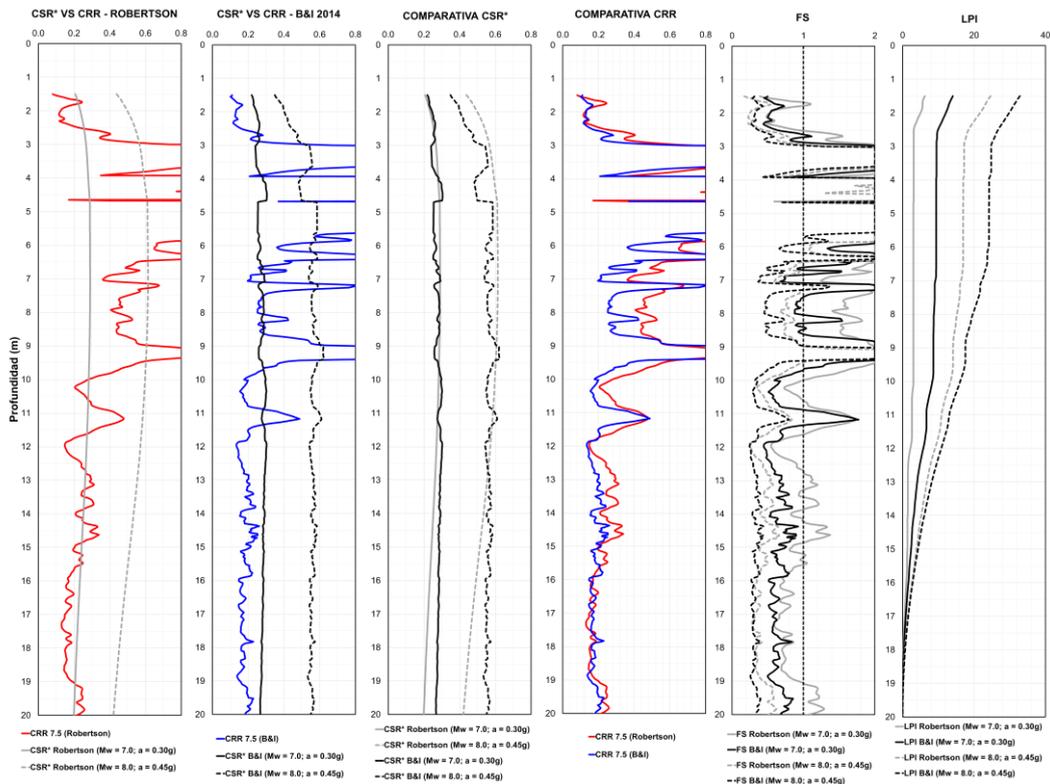
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 19

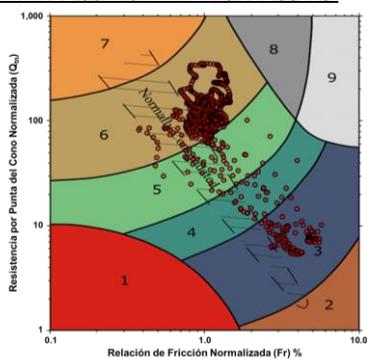
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-19
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

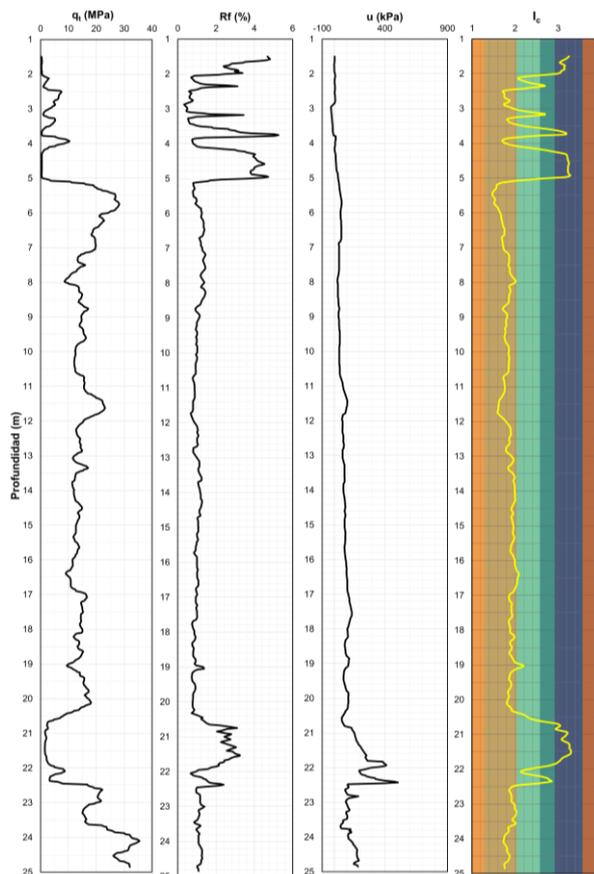
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	1.8	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	6.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	20.0	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	22.4	Efectos severos

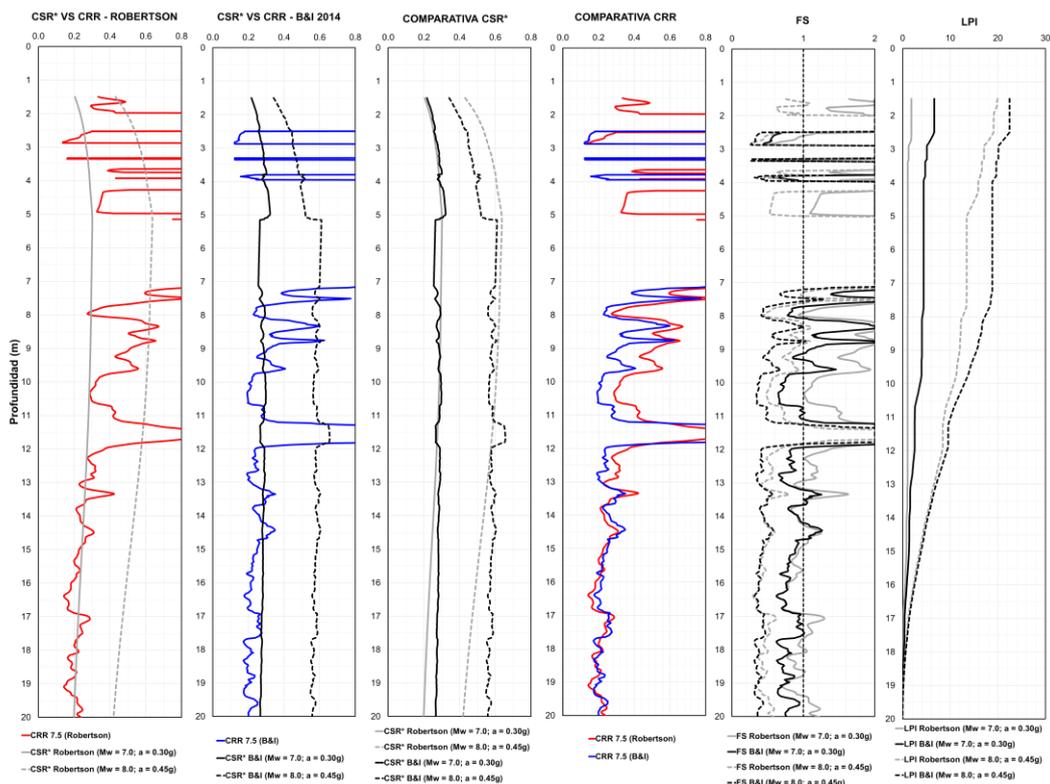
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 20

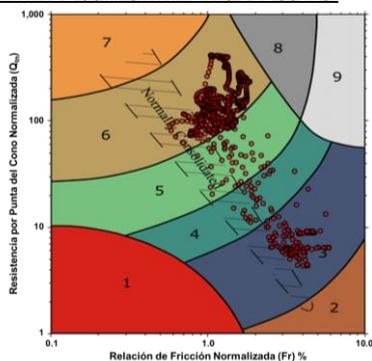
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-20
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

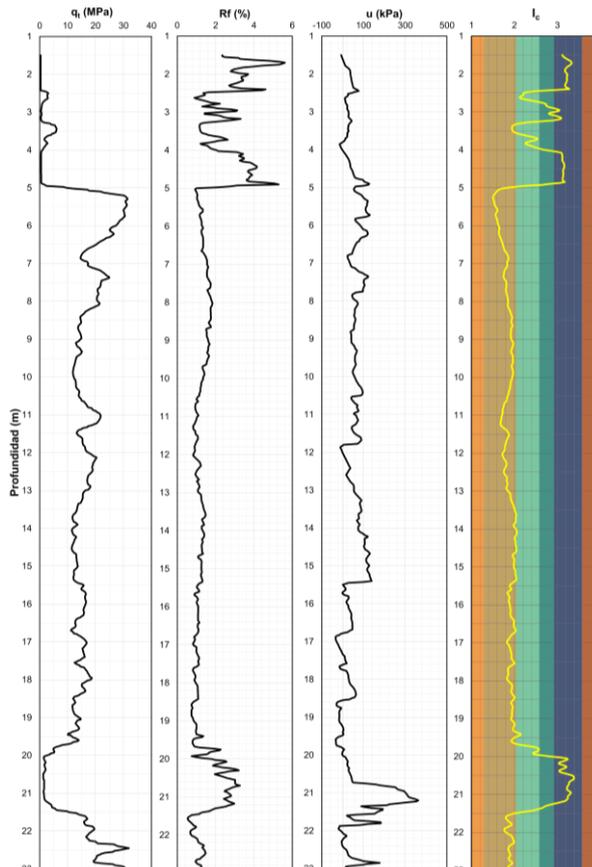
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	0.8	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	1.9	No hay efectos de licuación
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	17.0	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	12.6	Probables efectos severos

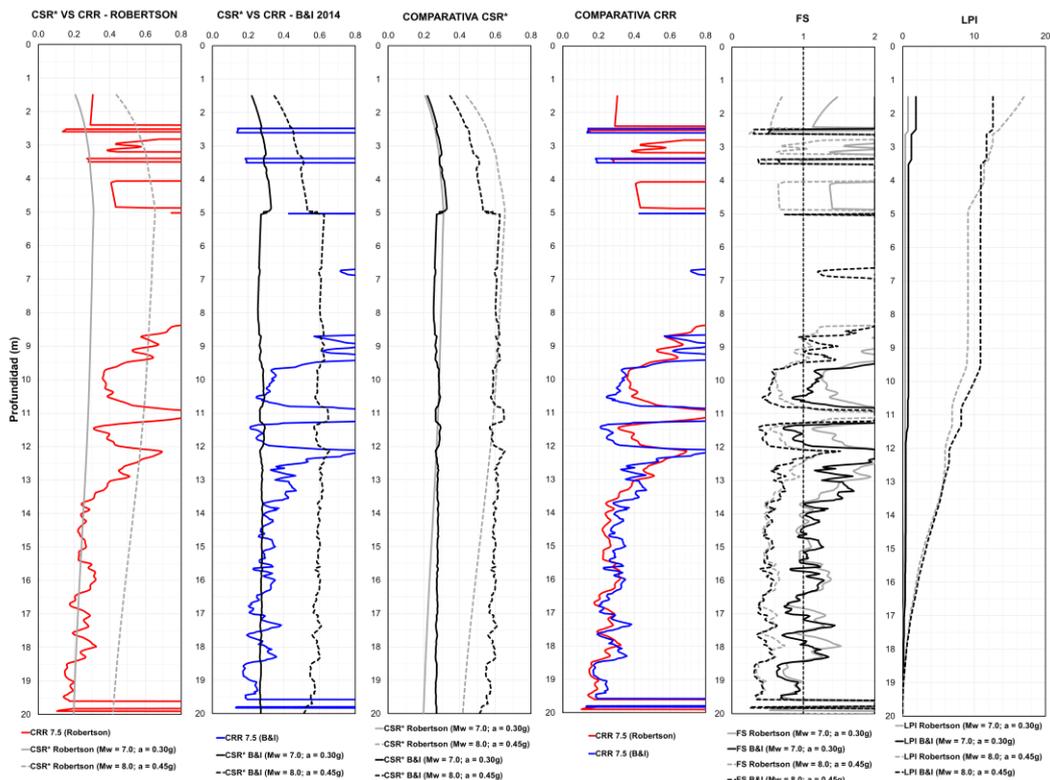
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 21

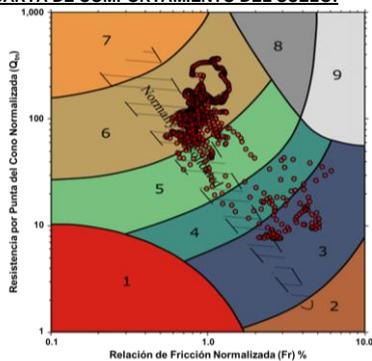
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-21
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

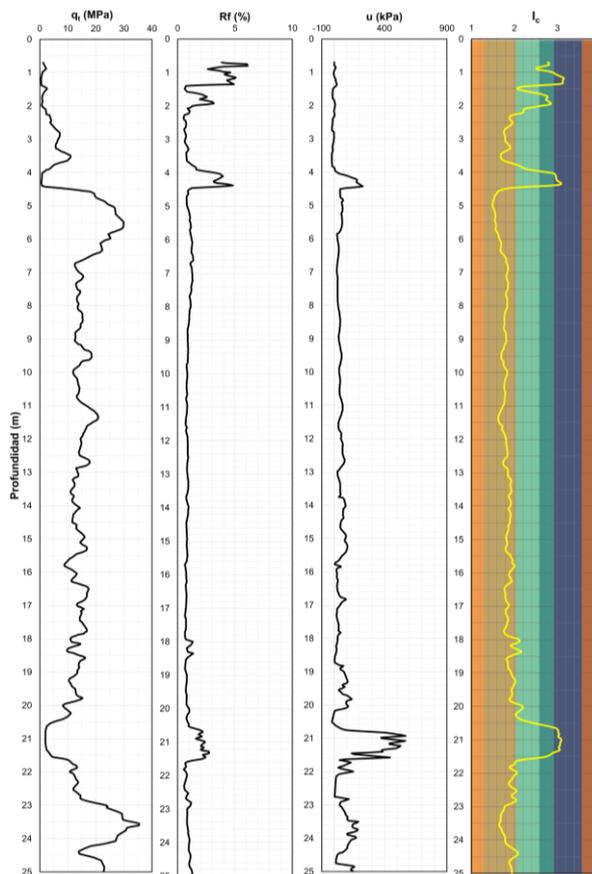
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	4.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	13.4	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	22.5	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	31.4	Efectos severos

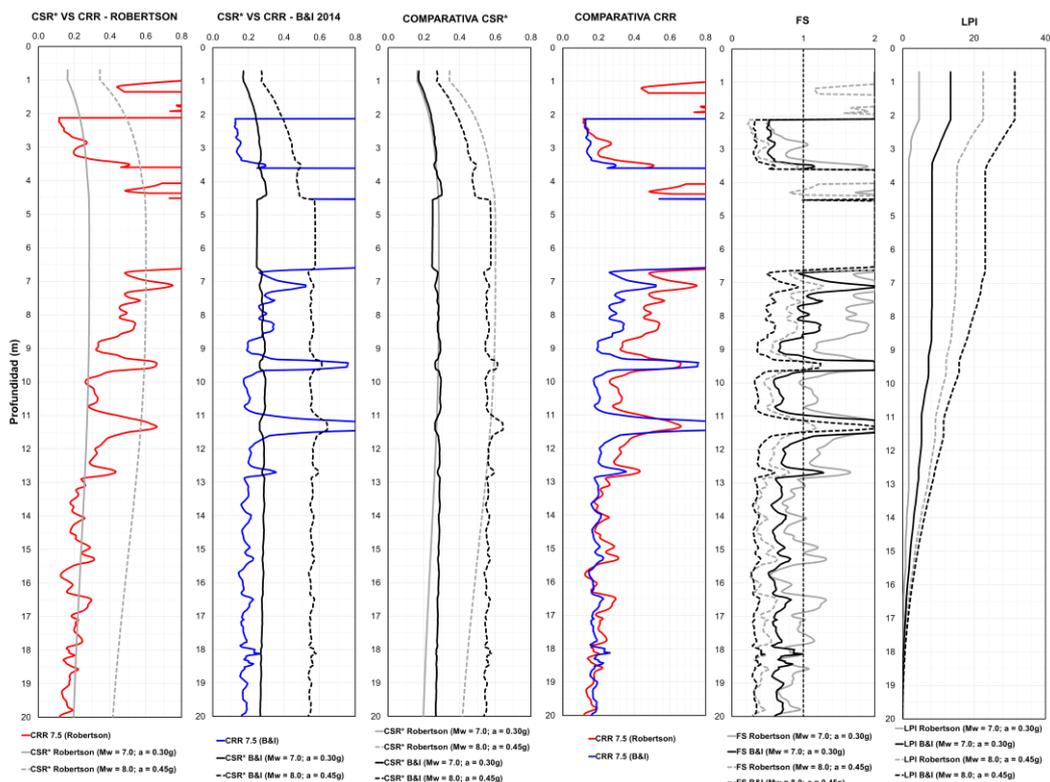
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 22

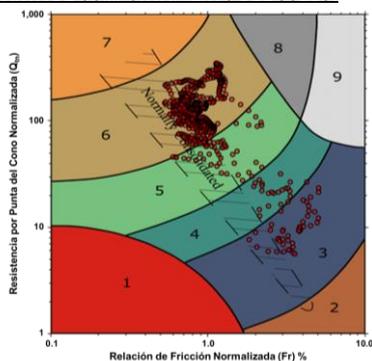
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-22
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

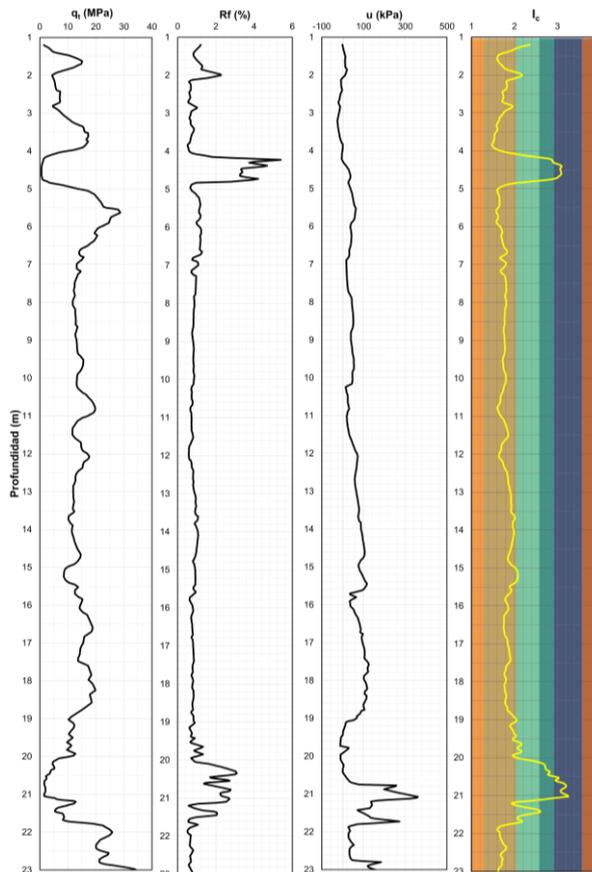
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	3.2	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	14.7	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	25.5	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	34.3	Efectos severos

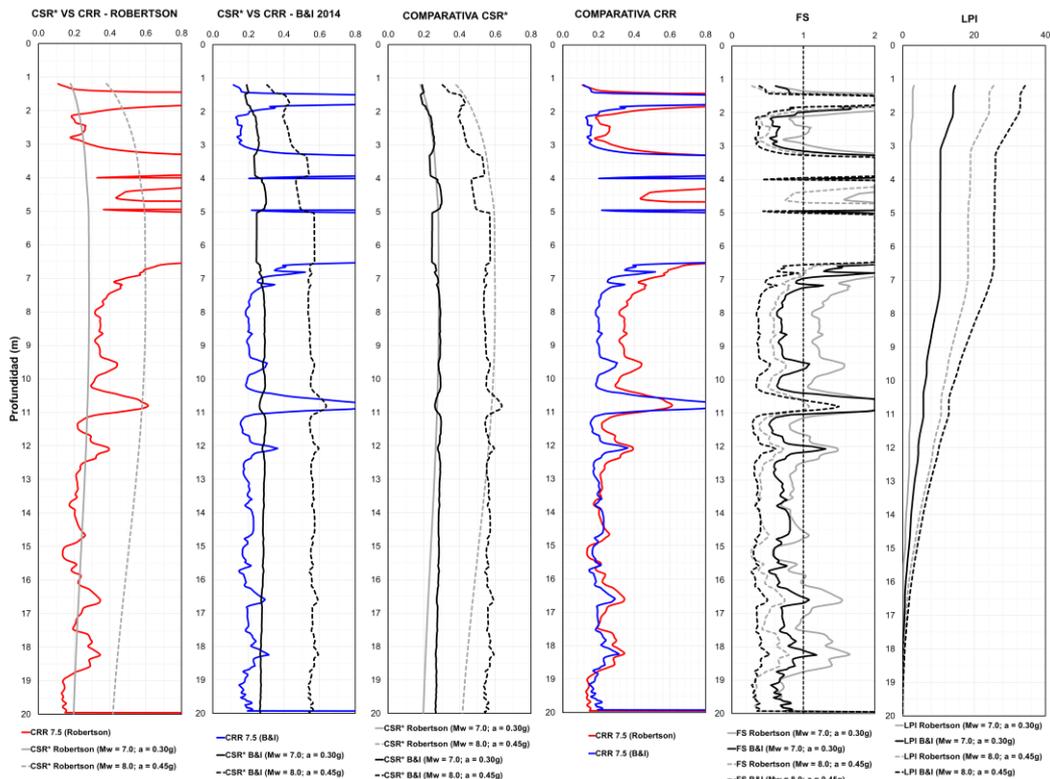
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 23

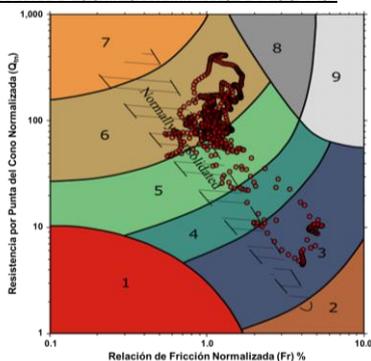
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	: CPT-23
Profundidad N.F. (m)	: 1.00
Escenario 01:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 7.00
Aceleración máxima (g)	: 0.30
Escenario 02:	
Magnitud Sismo (Mw)	: 8.00
Aceleración máxima (g)	: 0.45
Datos del equipo CPTu	
Tipo de Cono	: Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	: 2.00

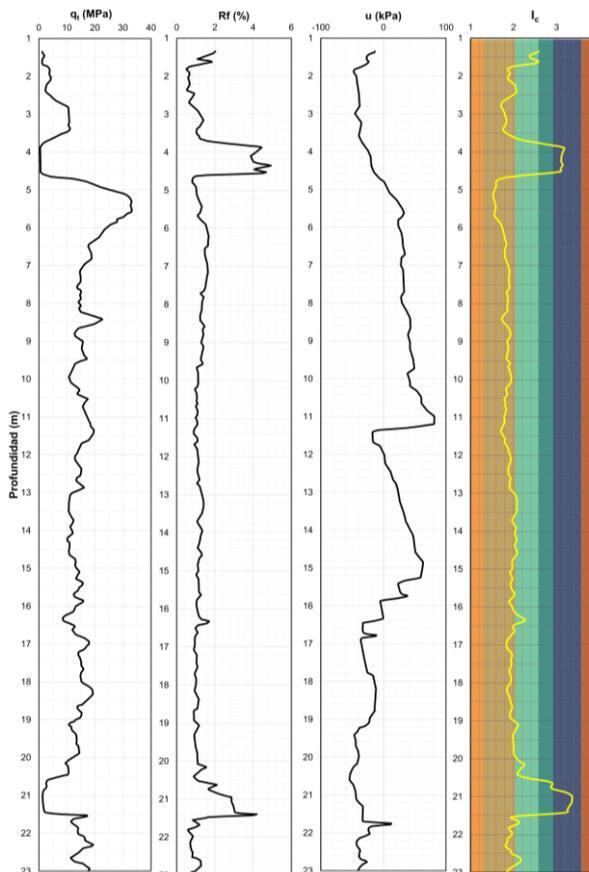
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	4.3	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	5.6	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	18.7	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	22.5	Efectos severos

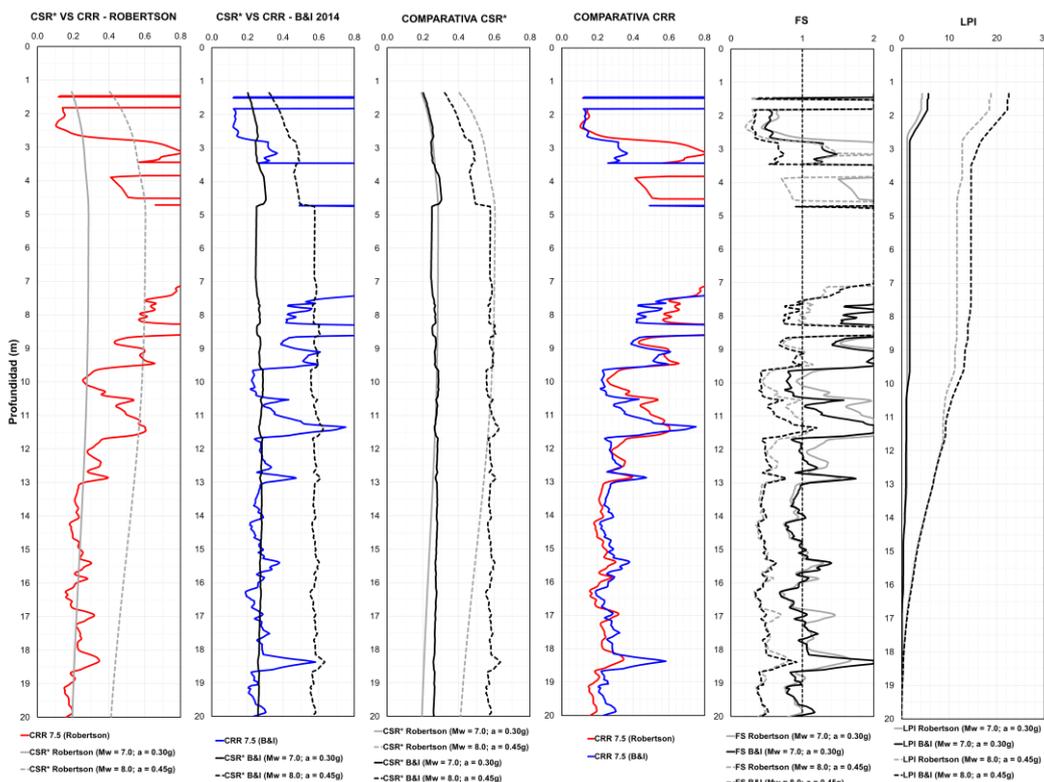
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 24

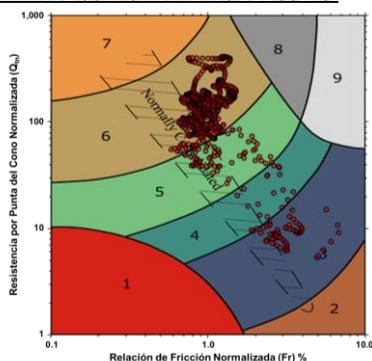
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-24
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

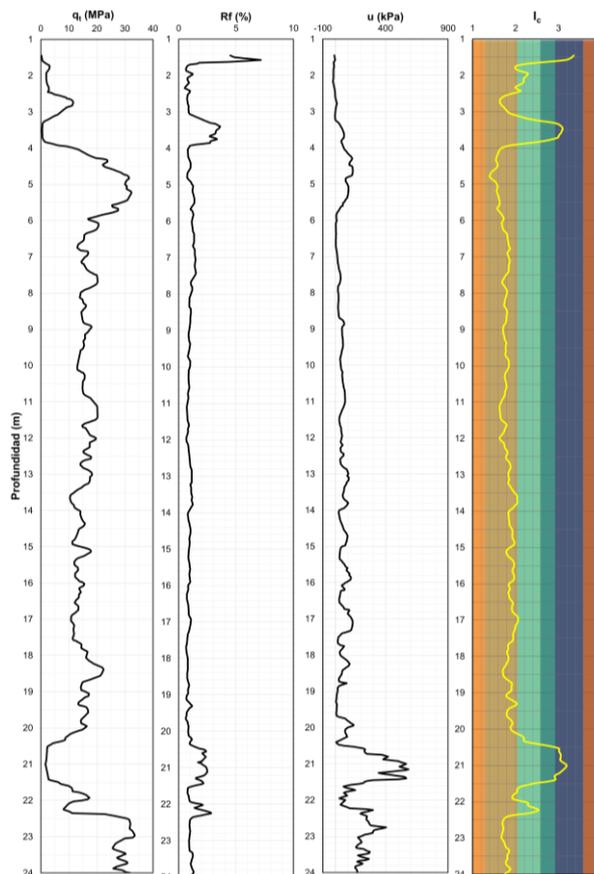
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	4.6	No hay efectos de licuación
	Boulanger e Idriss (2014)	8.1	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	18.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	24.0	Efectos severos

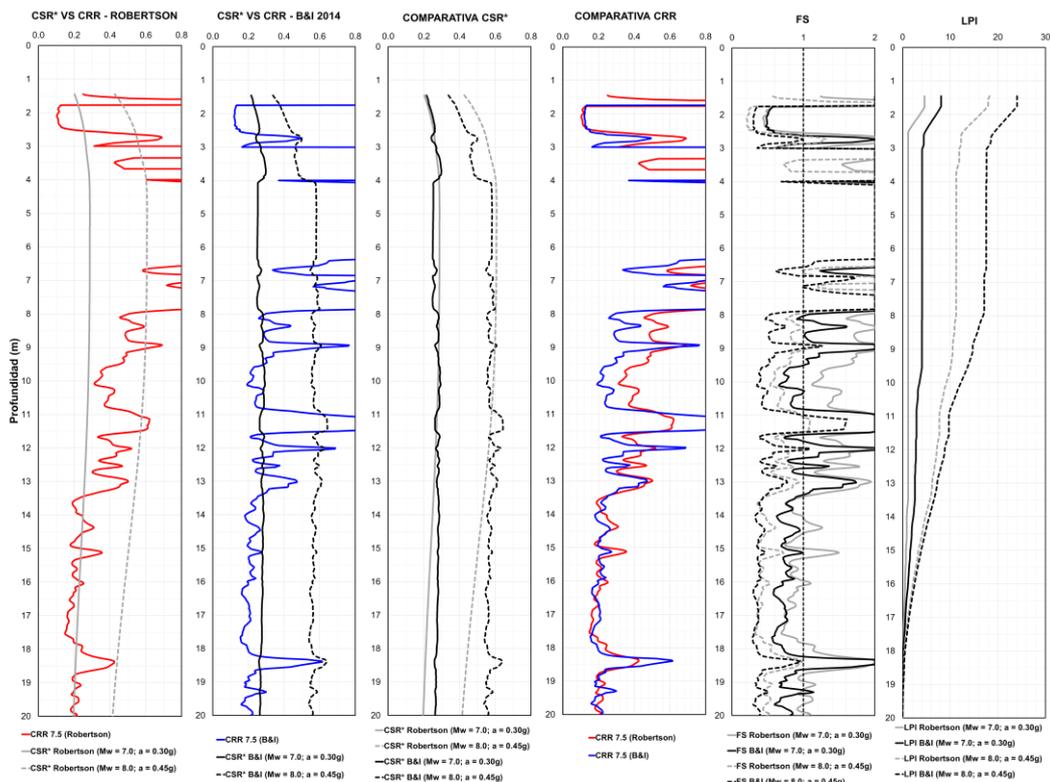
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 25

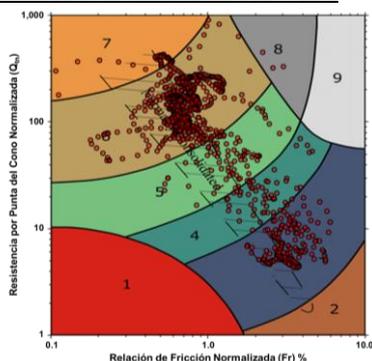
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-25
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

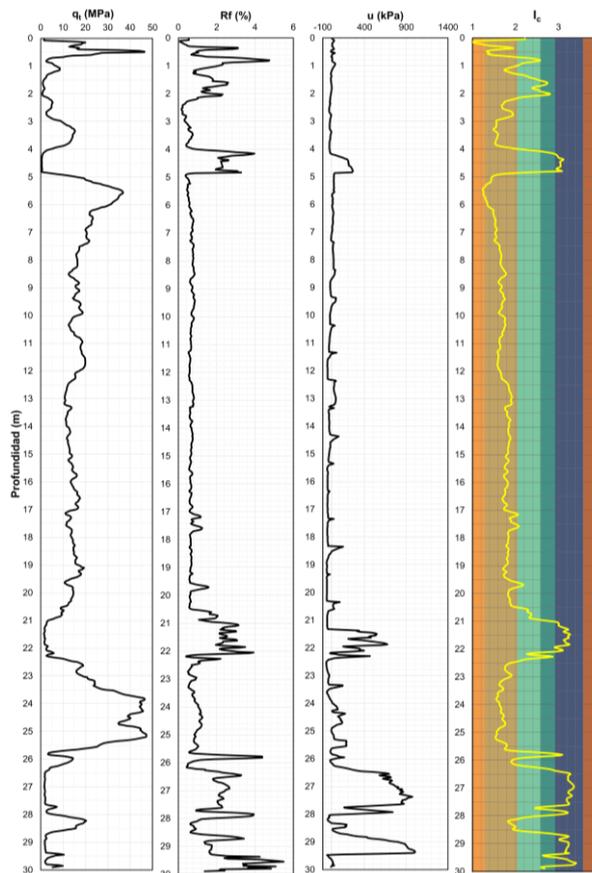
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	5.5	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	12.0	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	22.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	24.4	Efectos severos

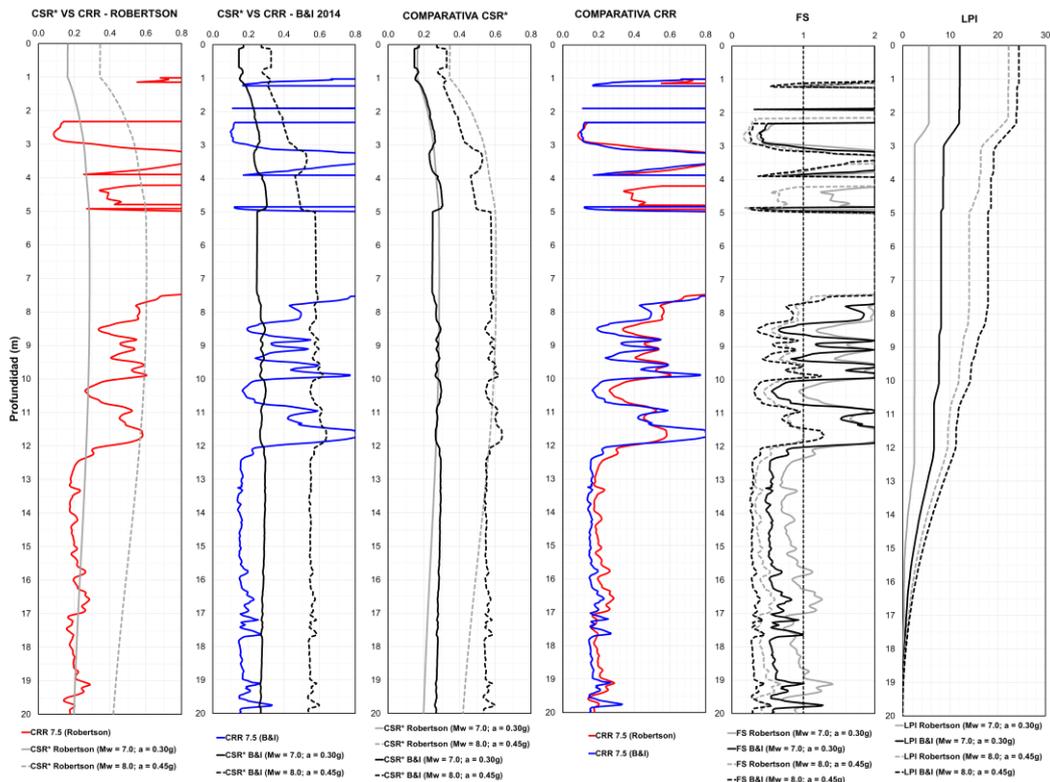
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 26

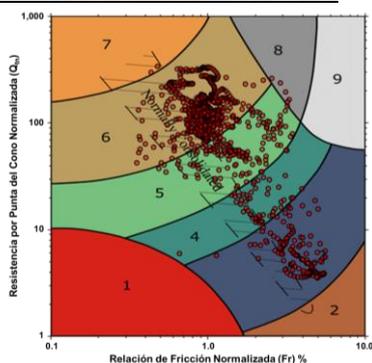
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-26
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

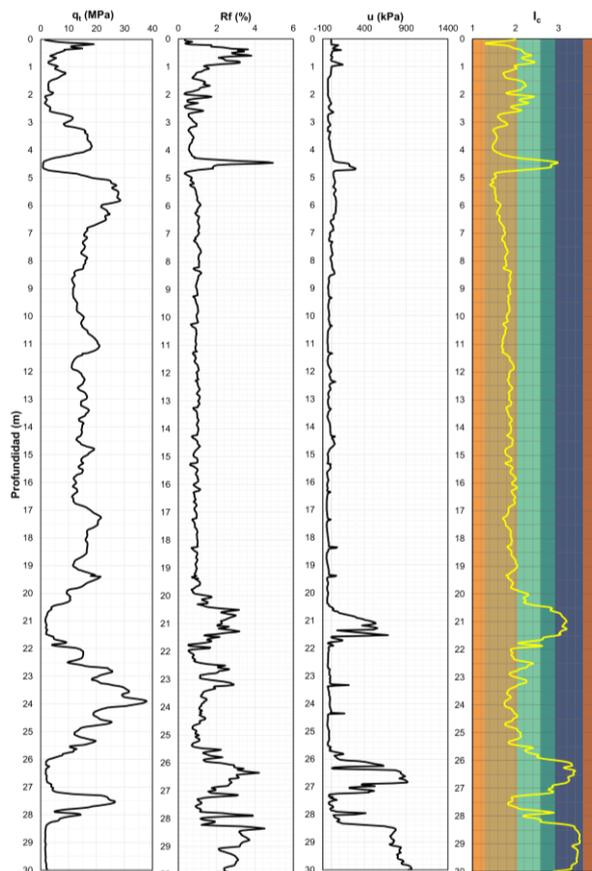
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	5.3	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	9.4	Probables efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	21.3	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	27.8	Efectos severos

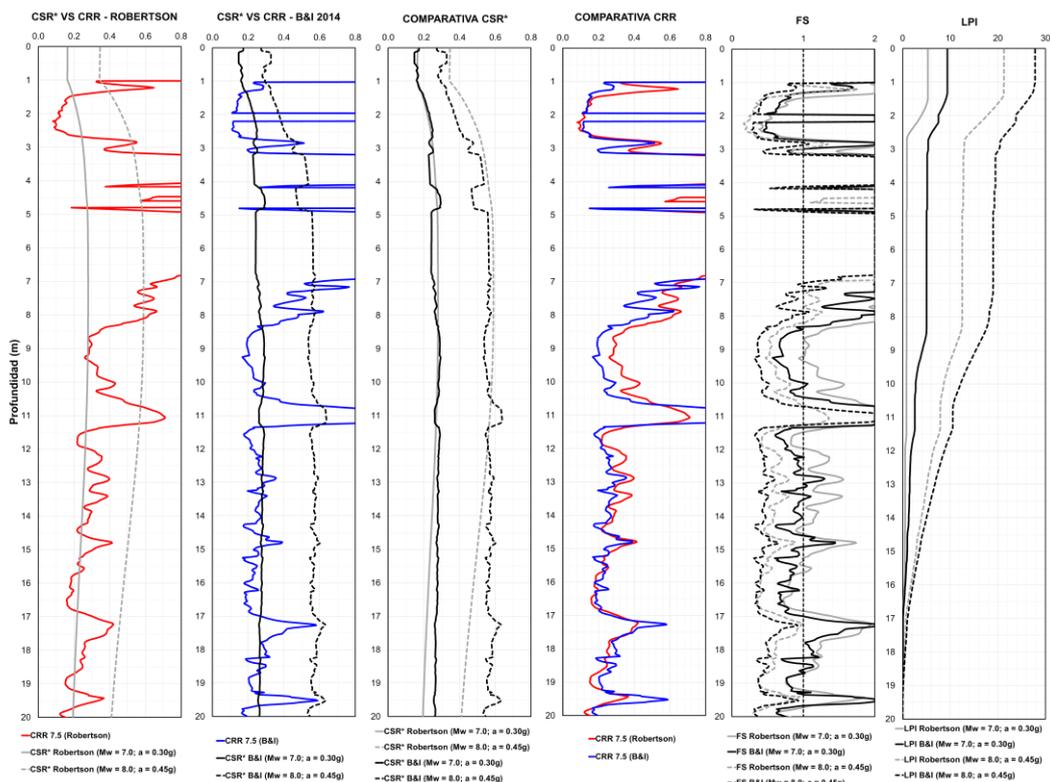
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 27

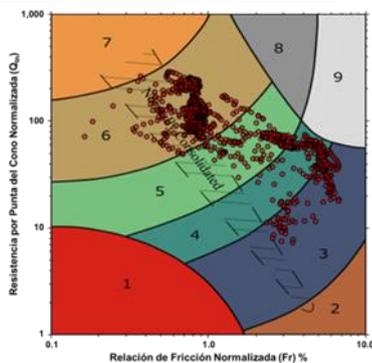
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-27
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

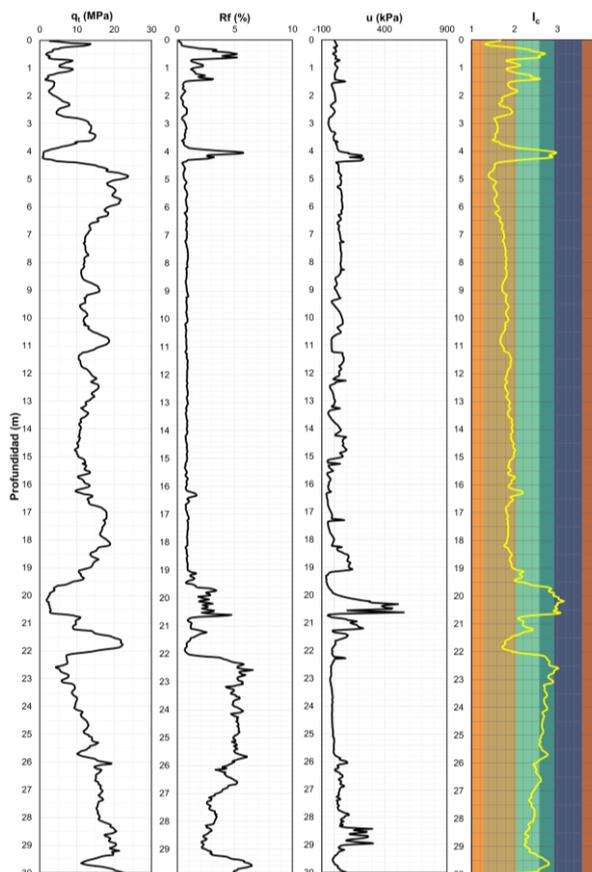
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	6.6	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	18.7	Efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	30.8	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	36.9	Efectos severos

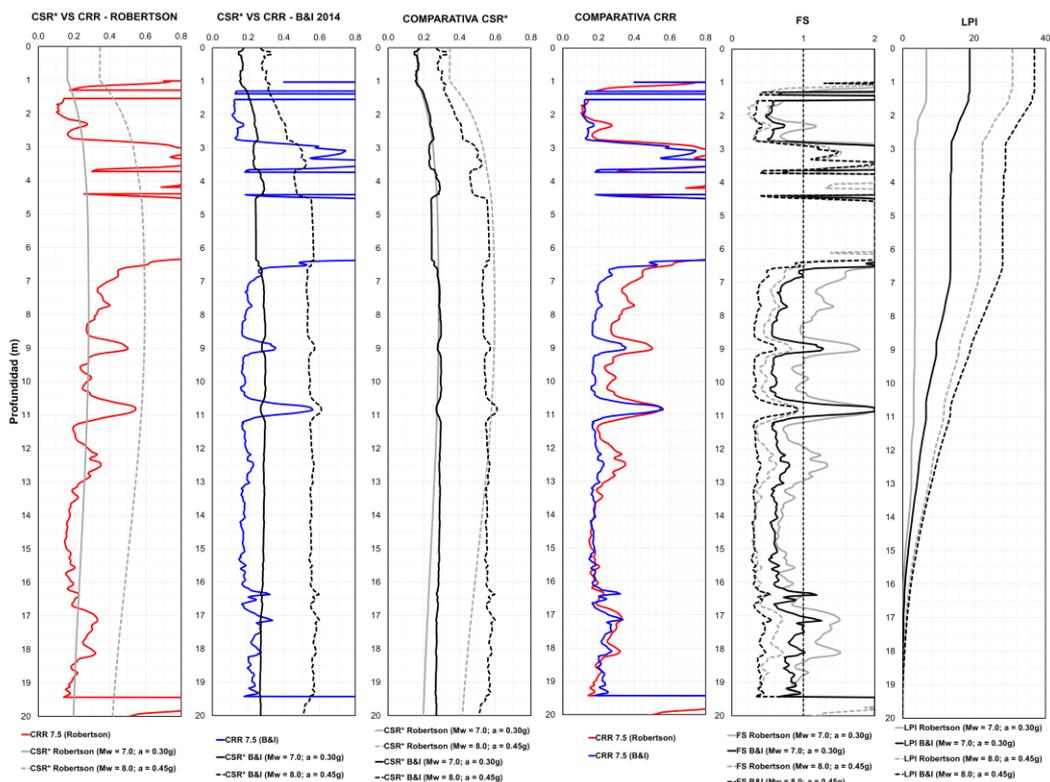
CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



DATA DEL ENSAYO CPTu:



ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN CPT – 28

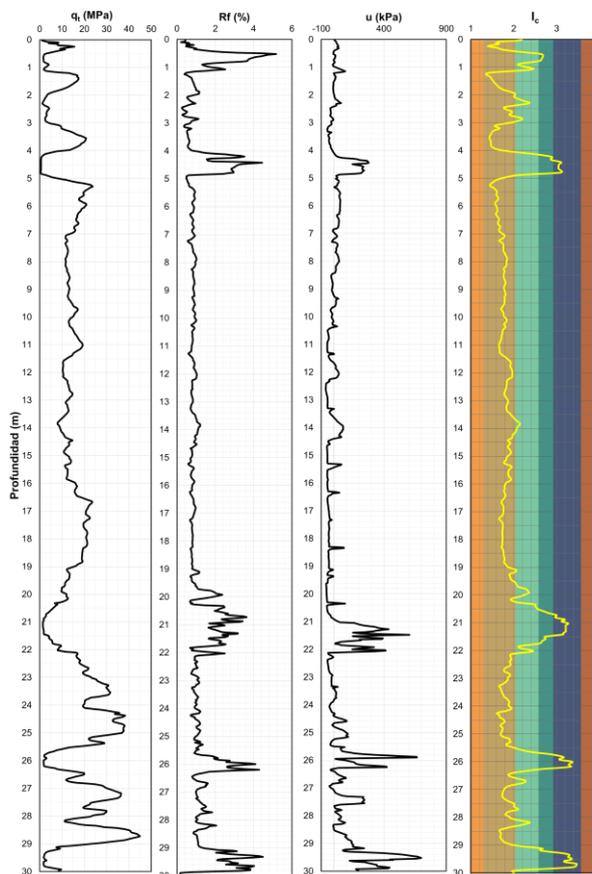
DESCRIPCIÓN DEL SONDAJE:

Sondaje	:	CPT-28
Profundidad N.F. (m)	:	1.00
Escenario 01:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	7.00
Aceleración máxima (g)	:	0.30
Escenario 02:		
Magnitud Sismo (Mw)	:	8.00
Aceleración máxima (g)	:	0.45
Datos del equipo CPTu		
Tipo de Cono	:	Eléctrico
Velocidad de Penetración (cm/s)	:	2.00

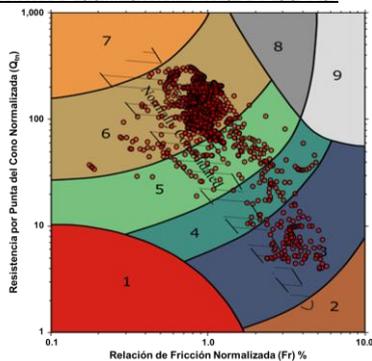
RESUMEN DE RESULTADOS:

ESCENARIO	MÉTODO	LPI	COMENTARIO
Mw = 7.0 a = 0.30g	Robertson (2009)	7.9	Probables efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	16.5	Efectos severos
Mw = 8.0 a = 0.45g	Robertson (2009)	28.0	Efectos severos
	Boulanger e Idriss (2014)	33.4	Efectos severos

DATA DEL ENSAYO CPTu:

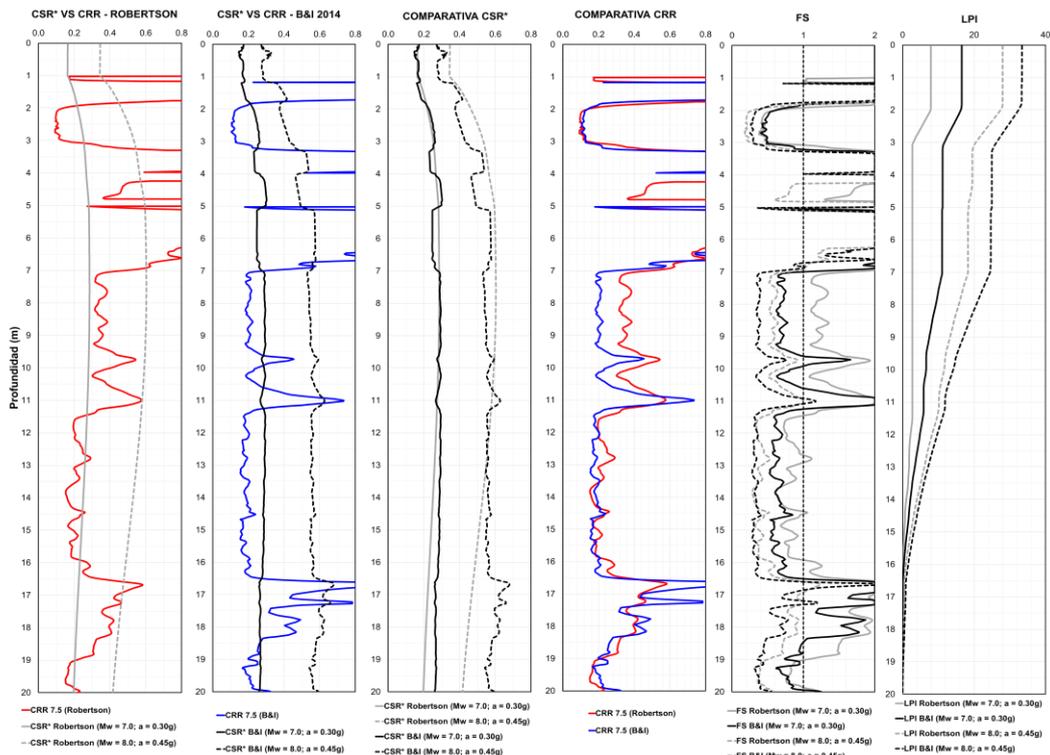


CARTA DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO:



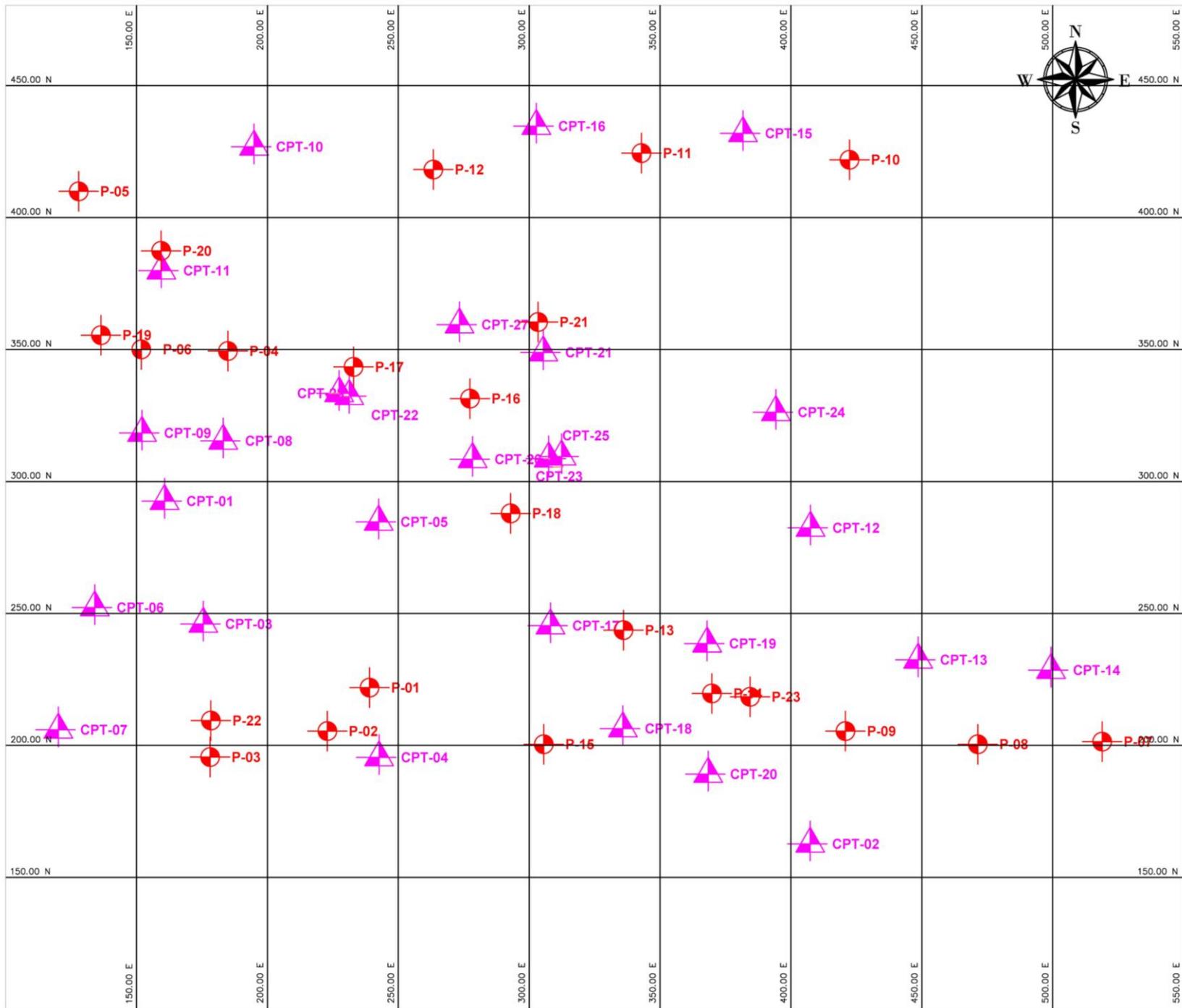
ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN:

E



ANEXO C

Plano de distribución de sondajes



UBICACIÓN DE ENSAYOS CPTu

Ensayo	Este (m)	Norte (m)
CPT-01	160.691	292.559
CPT-02	407.361	162.719
CPT-03	175.501	246.019
CPT-04	242.651	195.439
CPT-05	242.491	284.739
CPT-06	134.031	252.249
CPT-07	120.121	205.919
CPT-08	183.101	315.389
CPT-09	152.091	318.369
CPT-10	194.881	426.829
CPT-11	159.441	379.909
CPT-12	407.491	282.439
CPT-13	448.601	232.459
CPT-14	499.351	228.569
CPT-15	381.691	431.929
CPT-16	302.741	434.679
CPT-17	308.131	245.379
CPT-18	335.791	206.389
CPT-19	367.991	238.569
CPT-20	368.381	189.139
CPT-21	305.401	348.859
CPT-22	231.241	332.349
CPT-23	307.451	308.659
CPT-24	394.231	326.259
CPT-25	312.381	309.429
CPT-26	278.381	308.429
CPT-27	273.381	359.429
CPT-28	227.381	333.429

UBICACIÓN DE ENSAYOS SPT

Ensayo	Este (m)	Norte (m)
P-01	239.011	221.929
P-02	222.881	205.429
P-03	178.091	195.579
P-04	184.881	349.429
P-05	127.881	409.929
P-06	151.791	350.049
P-07	518.881	201.429
P-08	471.381	200.429
P-09	420.811	205.419
P-10	422.361	421.899
P-11	342.881	424.429
P-12	263.381	418.199
P-13	336.011	243.659
P-14	369.781	219.709
P-15	305.561	200.439
P-16	277.381	331.429
P-17	232.881	343.429
P-18	292.881	287.929
P-19	136.381	355.429
P-20	159.381	387.429
P-21	303.381	360.429
P-22	178.381	209.429
P-23	384.381	218.429

LEYENDA

	ENSAYO CPT
	ENSAYO SPT

REV.	FECHA	PLANO N°	PLANOS DE REFERENCIA	DESCRIPCIÓN DE LA REVISIÓN	DIS.	DIS.	REV.	APR.	ENCARGADO	PROYECTO	DISTRIBUCIÓN
A.	03/08/2024	P-01		EMITIDO PARA REVISIÓN	R.M.	J.B.	J.B.	Z.A.		ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ENSAYOS SPT Y CPTu PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LUBRICACIÓN EN LA COSTA NOROCCIDENTAL DEL PERÚ	
									ELABORADO POR: RAÚL MALACAS DISEÑADO POR: JOSE BARRANTES REVISADO POR: JOSE BARRANTES APROBADO POR: ZENÓN AVALAR	PAIS: PERÚ DEPARTAMENTO: PROVINCIA: DISTRITO:	
NOTA: LAS UNIDADES DE LOS PLANOS ESTÁN EN EL SISTEMA INTERNACIONAL.										 TÍTULO DE PROYECTO: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE ENSAYOS SPT Y CPTu PARA LA ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE LUBRICACIÓN EN LA COSTA NOROCCIDENTAL DEL PERÚ TÍTULO DE PLANO: PLANO DE EXPLORACIONES GEOTÉCNICAS ESCALA: 1:1500 HOJA: A3 CANTON: ZENÓN AVALAR DEPARTAMENTO: TACNA DISTRITO: P-01	