

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**APLICACIÓN DEL ENSAYO SCPT_u EN LA EVALUACIÓN
DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES POSTSISMO DE UNA
PILA DE LIXIVIACIÓN**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

GERSON SMITH URBINA LIRA
ID: 0000-0003-2850-2339

ASESOR

MSc. DENYS AMADOR PARRA MURRUGARRA
ID: 0000-0001-9096-4249

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”.**

Urbina Lira, Gerson Smith

gurbinal@uni.pe

920 850 449

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el día a día. Por poner en mi vida a grandes personas quienes haré mención en las siguientes líneas.

A mis padres, Mario Urbina Colchado y Maritza Lira Contreras, por ser ejemplo de trabajo, esfuerzo, humildad e integridad; por enseñarnos a sus hijos buscar ser las mejores personas y por darnos la mano en cada tropiezo y celebrar con nosotros cada triunfo. A mis hermanas Tatiana y Nury, en quienes siempre puedo confiar.

A mi amigo y mentor, ingeniero Ronald Landa, por ser mi guía como profesional y persona dentro y fuera del ámbito laboral. Por sus enseñanzas en geotecnia, que comenzó con preguntas sobre consolidación haciéndome repasar nuevamente libros de Lambe y K. Terzaghi. Este trabajo de investigación está fuertemente influenciado en sus enseñanzas.

A mi asesor, M.Sc. Ing. Denys Parra, por aceptar revisar mi tesis; y siempre estar presto a escuchar dudas, a ofrecer de su tiempo para enseñar y brindar recomendaciones. Su ejemplo es motivación para seguir mejorando como ingeniero geotécnico.

A mi esposa, Claudia Olano, por ser mi compañera en esta montaña rusa llamada vida, por estar conmigo en las buenas, en las no tan buenas y en las malas.

DEDICATORIA

A Dios,

A mis padres Mario y Maritza,

A mis hermanas Tatiana y Nury,

A mi esposa Claudia y mi hijo Derek.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract.....	7
Prólogo.....	9
Lista de tablas.....	10
Lista de figuras	11
Lista de símbolos y siglas	15
Capítulo I: Introducción.....	17
1.1 Generalidades.....	17
1.2 Problemática	20
1.3 Justificación.....	21
1.4 Objetivos	22
1.4.1 Objetivo general	22
1.4.2 Objetivos específicos	22
1.5 Formulación de la hipótesis	23
1.5.1 Hipótesis general	23
1.5.2 Hipótesis específicas	23
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	24
2.1 Introducción.....	24
2.2 Ensayo de piezocono sísmico (SCPTu)	24
2.2.1 Relaciones básicas	24
2.2.2 Características del piezocono sísmico.....	25
2.2.3 Interpretación del SCPTu.....	26
2.2.4 Ensayo de disipación de presión de poros	28
2.3 Teoría del estado crítico.....	29
2.3.1 Estimación del parámetro de estado	30
2.3.1.1 Formulación propuesta por Plewes <i>et al.</i> (1992).....	32
2.3.1.2 Formulación propuesta por Robertson (2010b).....	34
2.4 Licuación	35
2.4.1 Flujo por licuación	35
2.4.2 Licuación y movilidad cíclica	36
2.4.3 Susceptibilidad y evaluación del potencial de licuación	38
2.5 Resistencia cortante no drenada	38
2.5.1 Relación de resistencia no drenada remodelada.....	39
2.5.2 Relación de resistencia no drenada de fluencia ($S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$)	39

2.5.3	Resistencia residual o resistencia licuada	40
2.5.3.1	Formulación propuesta por Olson y Stark (2002)	42
2.5.3.2	Formulación propuesta por Jefferies y Been (2016).....	42
2.5.3.3	Formulación propuesta por Robertson (2021)	43
2.6	Estabilidad de taludes postsismo.....	44
Capítulo III: Caracterización geotécnica		46
3.1	Introducción.....	46
3.2	Aspectos geotécnicos de la pila en estudio.....	46
3.2.1	Características físicas del mineral lixiviado	47
3.2.2	Régimen de flujo transitorio en la pila de lixiviación	48
3.2.3	Permeabilidad en mineral lixiviado	49
3.3	Investigaciones geotécnicas en la pila de lixiviación	51
3.4	Modelos geotécnicos	53
3.4.1	Construcción de modelos geotécnicos	53
3.5	Caracterización geotécnica del mineral lixiviado	64
3.5.1	Características físicas.....	64
3.5.2	Ensayos triaxiales y curva de estado crítico	67
3.5.3	Ángulo de fricción interna en condiciones drenadas	69
3.5.4	Relación de resistencia no drenada (S_u/σ'_{v0}).....	70
3.5.5	Relación de resistencia no drenada de fluencia ($S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$)	73
3.5.6	Parámetro de estado (ψ).....	76
3.5.6.1	Registros obtenidos aplicando Plewes <i>et al.</i> (1992).....	76
3.5.6.2	Registros obtenidos aplicando Robertson (2010b).....	77
3.5.6.3	Valores ψ registrados.....	77
3.5.7	Relación de resistencia no drenada licuada (S_{uLIQ}/σ'_{v0}).....	82
3.5.7.1	Registros obtenidos aplicando Olson y Stark (2002).....	82
3.5.7.2	Registros obtenidos aplicando Jefferies y Been (2016)	82
3.5.7.3	Registros obtenidos aplicando Robertson (2021).....	82
3.5.7.4	Valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} registrados	86
3.6	Interfase y suelo de cimentación	88
Capítulo IV: Evaluación del potencial de licuación en mineral		89
4.1	Introducción.....	89
4.2	Aspectos geotécnicos asociados a la evaluación del pontencial de licuación	90
4.2.1	Relación $K_{SAT} - I_C$	90
4.2.2	Velocidad de ondas de corte (V_s).....	92
4.2.3	Sismicidad	94
4.2.3.1	Espectro de peligro uniforme y aceleración máxima del terreno (PGA).....	94

4.2.3.2	Magnitud momento del terremoto de diseño (M_w).....	95
4.3	Análisis no lineal unidimensional de respuesta sísmica	95
4.3.1	Registros tiempo-historia de aceleración base	96
4.3.2	Ajuste espectral para la generación de registros sintéticos	97
4.3.3	Propiedades dinámicas.....	99
4.3.4	Metodología de análisis	101
4.3.5	Condiciones de análisis	102
4.3.6	Resultados obtenidos	103
4.4	Evaluación del potencial de licuación	109
4.4.1	Introducción.....	109
4.4.2	Metodología de análisis propuesta	110
4.4.2.1	Relación de resistencia cíclica (CRR).....	111
4.4.3	Condiciones de análisis	112
4.4.4	Resultados obtenidos	113
	Capítulo V: Análisis de estabilidad de taludes postsismo.....	120
5.1	Introducción.....	120
5.2	Secciones de análisis y parámetros geotécnicos	120
5.3	Metodología de análisis	123
5.4	Criterios y condiciones de análisis.....	123
5.5	Discusión e interpretación de resultados	126
5.6	Acciones recomendadas para medir el desempeño geotécnico de la pila de lixiviación evaluada	128
5.6.1	Ejecución de sondajes SCPTu	128
5.6.2	Monitoreo de cargas de presión de poros	129
5.6.3	Definición de cargas de presión de poros <i>threshold</i>	130
5.6.4	Controles operacionales	130
	Conclusiones	132
	Recomendaciones	137
	Referencias	140
	Anexos	144

RESUMEN

En los últimos años en la explotación de minerales de baja ley, por medio del riego de solución en pilas, la tendencia actual muestra que el mineral que se extrae del tajo es cada vez más fino, proviene de distintas fuentes litológicas, presenta características físicas aleatorias y que apilado muestra un desempeño, mecánico e hidráulico, variable; siendo esta la problemática y justificación de la presente tesis especificados en el Capítulo I. Estas variaciones requieren ser tratadas con una herramienta que las capture, que las mida, que las proyecte en la construcción de una sección de análisis y que permita discernir qué capas de la pila son potencialmente licuables de acuerdo con la metodología aquí propuesta bajo la aplicación de sondajes SCPTu; logrado ello, el desempeño postismo de la pila de lixiviación puede ser evaluado con confiabilidad siendo este el principal objetivo de la tesis.

En el Capítulo II se expone el marco teórico empleado a fin de desarrollar la tesis, donde conceptos como estado *in situ* del mineral lixiviado, así como resistencias no drenadas y licuadas son presentadas y asociadas a las correlaciones obtenidas por medio del empleo del SCPTu. Además, son abordados conceptos de licuación y análisis de estabilidad postsismo que son los principales puntos por estudiar en el presente trabajo de investigación.

En el Capítulo III se propone una metodología de construcción de modelos geotécnicos empleando SCPTu, bajo un enfoque de características de comportamiento en reemplazo del estándar basado en características físicas. Se clasifica el mineral lixiviado en términos de su estado: contractivo o dilatante; de su tipo de comportamiento de suelo (SBT, por sus siglas en inglés); y de su permeabilidad representada por la conductividad hidráulica (K_{SAT}). Esta última se presenta como un vínculo entre los enfoques de características de comportamiento y físicas, tan distintos en concepto, pero que requieren ser contrapuestos para proponer la equivalencia entre las mediciones de los SCPTu y la K_{SAT} mínima en el diseño de pilas de lixiviación.

Además, se desarrolla en el Capítulo III, la caracterización geotécnica basada en los registros de los SCPTu para estimar parámetros de resistencia en el mineral lixiviado para los escenarios: estático drenado; estático no drenado y postsismo. Se emplearon formulaciones empíricas para la estimación del ángulo de fricción

(ϕ'), relación de resistencia no drenada (S_u/σ'_{v0}) y de fluencia ($S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$). Se obtuvieron los perfiles del estado *in situ* del mineral, representado por el parámetro de estado (ψ), y con base en ellos se estimó la resistencia no drenada licuada (S_{uLIQ}/σ'_{v0}) bajo una formulación basada en la mecánica del estado crítico. De forma breve se bosquejaron los parámetros adoptados para la interfase y el suelo de cimentación.

Según el estado de la práctica, la evaluación del potencial de licuación se realiza asumiendo un nivel freático hidrostático que cubre toda la altura de la pila, sin embargo, las pilas de lixiviación están sujetas a un régimen hidrodinámico de infiltración lo que resulta en un perfil de presiones de poro variable dependiente de la K_{SAT} y del nivel de esfuerzo. Por lo tanto, a fin de ajustar los estándares actuales de la evaluación del potencial de licuación, en el Capítulo IV se propone también un criterio en función de las características de comportamiento *in situ* del mineral lixiviado dominado por finos utilizando SCPTu, la relación K_{SAT} - tasa de riego, la distribución de cargas de presión de poros de equilibrio (u_0) y el estado *in situ* del mineral basado en el parámetro de estado (ψ), a fin de identificar qué capas serían propensas a la licuación e incluir dichas capas en los modelos geotécnicos a fin de desarrollar la evaluación de la estabilidad postsismo. Dicho criterio es una herramienta de primer filtro para la identificación de mineral dominado por finos potencialmente licuable en concordancia con los aspectos operativos y geotécnicos de una pila de lixiviación.

Finalmente, el Capítulo V presenta el análisis de estabilidad de taludes realizado tomando como base la caracterización geotécnica y la evaluación de potencial de licuación basadas en los SCPTu, desarrollando la evaluación para escenarios estático drenado, estático no drenado y postsismo, donde los dos últimos son representativos de la pila evaluada que presentaría zonas saturadas debido a la retención de solución. Los factores de seguridad son presentados de manera referencial, y tuvieron como objetivo mostrar las ventajas que supone el uso del enfoque de las características de comportamiento, *i.e.* el uso exclusivo de los SCPTu en la construcción del modelo geotécnico de la sección de análisis que comprenden los distintos estados en los que se encuentra el mineral en términos de su desempeño mecánico; algo que no hubiese sido posible de diferenciar mediante una clasificación por características físicas. La propuesta de esta forma de construcción del modelo simplifica sustancialmente la gestión de campañas

geotécnicas sucesivas y mejora la confiabilidad en la extensión de las capas críticas en una pila de lixiviación que son las que están dominadas por su matriz fina. Los factores de seguridad y los modelos construidos fueron interpretados a fin de implementar un plan de acción que incluye la instalación de piezómetros de cuerda vibrante que permita monitorear de forma continua el desempeño de la pila ante la generación de cargas de presión de poros y mantener estas por debajo de un nivel de alerta con el fin de mitigar las consecuencias de un eventual desencadenamiento de la licuación en las capas identificadas como efectivamente licuables.

ABSTRACT

In recent years, the exploitation of low-grade ore through the irrigation of solution in heaps has witnessed a growing trend of finer ore, that comes from different lithological sources. This ore exhibits random physical characteristics and variable mechanical and hydraulic behaviors when stacked; this being the problem and justification of this thesis specified in Chapter I. Assessing these variations requires a tool capable of capturing and measuring them, projecting them onto an analysis section, and identifying potentially liquefiable layers within the heap. This methodology, proposed herein, is based on the application of the SCPTu test and enables reliable computation of the post-earthquake performance of the heap leach pad, this being the main objective of the thesis.

In Chapter II presents the theoretical framework used to develop the thesis, where concepts such as in situ state of the leached ore as well as undrained and liquefied resistances are presented and associated with the correlations obtained through the use of SCPTu. In addition, concepts of liquefaction and post-earthquake stability analysis are addressed, which are the main points to be studied in this research.

This thesis, In Chapter III, proposes a SCPTu-based geotechnical model building methodology under a behavioral-characteristics approach, intended to replace the standard physical-characteristics approach. The leached ore is classified in terms of its state: contractive or dilatant; its soil behavior type (SBT); and its permeability represented by hydraulic conductivity (K_{SAT}). The relationship between behavioral and physical characteristics is established through K_{SAT} , serving as a link between the two approaches. Despite their distinct concepts, it is crucial to juxtapose them to propose the equivalence between SCPTu measurements and minimum K_{SAT} in heap leach pad design. Additionally, in Chapter III, the geotechnical characterization primarily relies on SCPTu to estimate shear strength parameters of the leached ore under different scenarios: static drained; static undrained and post-earthquake conditions. Empirical formulations were used to estimate the friction angle (ϕ'), undrained strength ratio (S_u/σ'_{v0}), and yield strength ratio ($S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$). The *in situ* state of the soil profile, represented by the state parameter (ψ), was estimated using a formulation based on critical-state soil mechanics.

Current practice in liquefaction potential assessment assumes a hydrostatic water table covering the entire height of the heap leach pad. However, heap leach pads operate under a hydrodynamic seepage regime, resulting in a variable pore pressure distribution influenced by K_{SAT} and stress level. To address the need for adjusting current liquefaction potential assessment standards, this thesis in Chapter IV also proposes a criterion based on the in situ behavioral characteristics of the fines-controlled leached ore using SCPTu data. The criterion incorporates the K_{SAT} - irrigation rate relationship, pore pressure at equilibrium (u_0), and the *in situ* state of the ore represented by the state parameter (ψ). By employing this criterion, it becomes possible to identify layers that are indeed prone to liquefaction and include these layers in geotechnical models to develop post-earthquake+ $\dot{\epsilon}$ stability assessment. This criterion serves as a first-screening tool for the identification of potentially liquefiable fines-controlled ore, in accordance with the operational and geotechnical considerations in heap leach practices.

Finally, in Chapter V, slope stability analysis was conducted considering the SCPTu-based geotechnical characterization and liquefaction potential evaluation. The evaluation encompassed static-drained, static-undrained and post-earthquake scenarios, where the last two are representative of heaps with saturated zones due to solution retention. Factors of safety are presented as reference values, highlighting the advantages of adopting the behavioral-characteristics approach. This approach relies solely on SCPTu data to construct the geotechnical model of the analysis section, capturing the various mechanical performance states of the ore. This distinction would not have been possible through a classification based solely on physical characteristics. The proposed model construction methodology significantly simplifies the management of successive geotechnical field investigations programs and enhances reliability in identifying critical layers in a heap leach of fines-controlled ore. The factors of safety and constructed models were construed to implement an action response plan which incorporates the installation of vibrating-wire piezometers. These piezometers serve to continuously monitor the heap's performance by measuring pore pressure heads and ensuring they remain below a designated threshold. This approach aims to mitigate the potential consequences of liquefaction in the identified layers deemed susceptible to liquefaction.

PRÓLOGO

El presente trabajo de tesis trata de la evaluación del fenómeno de licuación en una pila de lixiviación con problemas de retención de solución debido a la presencia de material fino en el mineral de la pila. Debido a que no se trata de un problema típico como en suelos naturales, la evaluación fue realizada a partir de un enfoque que toma en cuenta las características de comportamiento de los materiales investigados en lugar del enfoque clásico a partir de sus características físicas. Bajo este enfoque es necesario determinar las siguientes características en el mineral lixiviado de la pila: estado contractivo o dilatante, tipo de comportamiento y la permeabilidad. Los resultados del ensayo de penetración cónica (CPT) son fundamentales para determinar estas características.

La investigación ha comprendido el desarrollo de un amplio marco teórico y conceptual explicando las características del ensayo de penetración cónica con medición de presión de poros (CPTu) y los parámetros que se obtienen, el concepto de parámetro de estado y el fenómeno de licuación.

El trabajo ha sido realizado a partir de un caso de estudio de una pila de lixiviación ubicada al norte de Chile de la que se disponía de resultados de un robusto programa de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio llevados a cabo con fines de diseño de esta instalación, habiéndose realizado de manera rigurosa todos los análisis requeridos para evaluar el comportamiento sísmico, la licuación y finalmente la estabilidad de la estructura después de ocurrido el sismo considerando la ocurrencia de licuación en aquellos materiales previamente clasificados de acuerdo a las características mencionadas anteriormente.

Es necesario e importante reconocer el mérito y aporte de este trabajo de investigación al haber introducido un enfoque innovador en el análisis de este tipo de estructuras, cuyos materiales están dominados por finos y que al retener la solución de lixiviación pueden generar problemas de licuación en una zona de alta sismicidad, comprometiendo con ello su estabilidad geotécnica. Los resultados obtenidos han permitido llegar a importantes conclusiones y brindar recomendaciones para guiar futuras investigaciones en este tipo de estructuras.

Denys Parra Murrugarra
Asesor

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Tasas de riego y conductividad hidráulica equivalente recomendadas para el control del desempeño del mineral	50
Tabla 3.2	Resumen de ensayos SCPTu empleados	52
Tabla 3.3	Ensayos geofísicos y PPD en los SCPTu recopilados	52
Tabla 3.4	Clasificación del mineral lixiviado basada en I_B , I_C y CD	59
Tabla 3.5	Descripción de las secciones de análisis	63
Tabla 3.6	Resumen CSL - Muestras de mineral lixiviado	67
Tabla 3.7	Distribución de datos correspondiente al ϕ' ($^\circ$)	70
Tabla 3.8	Distribución de datos correspondiente al $SU_{remolded}/\sigma'_{v0}$	73
Tabla 4.1	Equivalencia entre K_{SAT} (cm/s) e I_C	91
Tabla 4.2	Ajuste no lineal ($A=Bx^n$) para los registros de V_s (m/s)	93
Tabla 4.3	Resumen de valores PGA - Análisis probabilísticos	94
Tabla 4.4	Parámetros principales de los registros tiempo-historia sísmicos bases ajustados espectralmente al $T_R = 475$ años para clase de sitio B	97
Tabla 4.5	Resumen de parámetros dinámicos de los materiales	101
Tabla 4.6	Profundidad de las zonas licuables (m)	119
Tabla 5.1	Parámetros geotécnicos - Análisis estáticos	121
Tabla 5.2	Parámetros geotécnicos - Análisis postsismo	122
Tabla 5.3	Criterios de diseño	123
Tabla 5.4	Factores de seguridad - Pila de lixiviación	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquematación del sondaje SCPT _u	26
Figura 2.2 Gráfica F_r (%) vs Q_{tn} para determinar el tipo de comportamiento del suelo normalizado (SBT_n)	27
Figura 2.3 Curvas de la variación del CRR respecto a la resistencia por punta corregida según el contenido de finos aparente	28
Figura 2.4 Ensayo PPD en pila de lixiviación.....	29
Figura 2.5 CSL y definición del ψ	30
Figura 2.6 (a) Actualización de la figura del tipo de comportamiento del suelo modificado a fin mostrar el potencial de flujo por licuación (b) Contornos para la estimación del ψ a partir del gráfico Q_{tn} - F_r	31
Figura 2.7 Tendencias entre los parámetros k y m con el λ_{10}	32
Figura 2.8 Relación entre λ_{10} y F (%).....	33
Figura 2.9 Comportamiento no drenado en una arena suelta	36
Figura 2.10 Comportamiento de una arena bajo una carga cíclica que desarrolla licuación cíclica	37
Figura 2.11 Comportamiento de un suelo bajo una carga cíclica que desarrolla movilidad cíclica.	37
Figura 2.12 Esquema de la respuesta no drenada bajo una carga estática o sísmica de un suelo arenoso, contractivo y saturado en términos de deformación cortante y de esfuerzo efectivo vertical o normal	40
Figura 2.13 Gráfica esfuerzo-deformación y respuesta de la presión de poros durante una prueba de compresión monótonica sin drenaje en arena suelta. Donde σ_d es el esfuerzo desviador y u_d es el exceso de presión de poros inducidos por el corte	40
Figura 2.14 Correlaciones para obtener S_{uLIQ}/σ'_{v0} a través del ensayo CPT.....	42
Figura 2.15 Sección transversal de una presa que ha fallado debido a la existencia de	

una zona que ha licuado. Además, se muestra la reconstrucción de la sección, a fin de esquematizar las deformaciones alcanzadas.....	44
Figura 3.1 Susceptibilidad de licuación	48
Figura 3.2 Distribución de cargas de presión estimada para un régimen transitorio debido a riego	49
Figura 3.3 Relación entre la conductividad hidráulica y el esfuerzo vertical efectivo en mineral lixiviado.....	50
Figura 3.4 Ubicación de los sondajes SCPTu ejecutados en la pila de lixiviación.	51
Figura 3.5 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica $Q_{tn}-F_r(\%)$ del sondaje (a) SCPTu-01 _Sección 1-1' (b) SCPTu-02_Sección 1-1' (c) SCPTu-03_Sección 1-1'.....	55
Figura 3.6 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica $Q_{tn}-F_r(\%)$ del sondaje (a) SCPTu-04 _Sección 2-2' (b) SCPTu-05_Sección 2-2' (c) SCPTu-06_Sección 2-2'.....	56
Figura 3.7 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica $Q_{tn}-F_r(\%)$ del sondaje (a) SCPTu-07 _Sección 3-3' (b) SCPTu-08_Sección 3-3' (c) SCPTu-09_Sección 3-3'.....	57
Figura 3.8 Perfiles I_c modificado en la sección 1-1'.....	58
Figura 3.9 Perfiles I_c modificado en la sección 2-2'.....	58
Figura 3.10 Perfiles I_c modificado en la sección 3-3'.....	59
Figura 3.11 Modelos geotécnicos construidos a partir de los sondajes SCPTu en las secciones (a) 1-1' (b) 2-2' (c) 3-3'.....	62
Figura 3.12 Curvas granulométricas del mineral lixiviado construidas a partir de la compilación de registros.	65
Figura 3.13 Límites de Atterberg del mineral lixiviado construido a partir de la compilación de registros.	66
Figura 3.14 Contenido de finos versus gravedad específica del mineral lixiviado construido a partir de la compilación de registros.	66
Figura 3.15 (a) Trayectoria de esfuerzos efectivos del ensayo triaxial CU (b) Línea de	

estado crítico (CSL).	68
Figura 3.16 Ángulo de fricción interna (ϕ') obtenidos de los sondajes SCPTu.....	69
Figura 3.17 Histograma correspondiente a los valores ϕ' ($^{\circ}$) registrados.....	70
Figura 3.18 Microestructura presente en el mineral lixiviado auscultado.....	71
Figura 3.19 Valores $S_{u\text{remolded}}/\sigma'_{v0}$ registrados en los sondajes SCPTu.....	72
Figura 3.20 Valores $S_{u\text{(yield)}}/\sigma'_{v0}$ obtenidos a partir de los sondajes SCPTu.....	75
Figura 3.21 ψ calculados	76
Figura 3.22 ψ estimados	77
Figura 3.23 Perfiles de ψ promedio en la sección 1-1'.....	79
Figura 3.24 Perfiles de ψ promedio en la sección 2-2'.....	80
Figura 3.25 Perfiles de ψ promedio en la sección 3-3'.....	81
Figura 3.26 Perfiles de $S_{u\text{LIQ}}/\sigma'_{v0}$ (1).....	83
Figura 3.27 Perfiles de $S_{u\text{LIQ}}/\sigma'_{v0}$ (2).....	84
Figura 3.28 Perfiles de $S_{u\text{LIQ}}/\sigma'_{v0}$ (3).....	85
Figura 3.29 Perfiles de $S_{u\text{LIQ}}/\sigma'_{v0}$ promedio.....	87
Figura 4.1 Valores K_{SAT} (cm/s) e I_c en mineral lixiviado.....	91
Figura 4.2 Registros V_s (m/s) registradas en la pila de lixiviación evaluada.....	93
Figura 4.3 Espectros de diseño - Sitio de clase B	95
Figura 4.4 Espectros de aceleraciones ajustados al espectro de un periodo de retorno $T_R = 475$ años	99
Figura 4.5 Propiedades dinámicas del mineral. (a) Curvas de reducción del módulo de corte (b) Curvas de razón de amortiguamiento.....	100
Figura 4.6 Relación de esfuerzos cíclicos en los sondajes SCPTu.....	104
Figura 4.7 Curvas $CSR_{0,65} - T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método simplificado - Sección 1-1'.....	106
Figura 4.8 Curvas $CSR_{0,65} - T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método simplificado - Sección 2-2'.....	107
Figura 4.9 Curvas $CSR_{0,65} - T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método	

simplificado - Sección 3-3'	108
Figura 4.10 CRR del mineral lixiviado a partir de los sondajes SCPTu.....	111
Figura 4.11 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-01.....	113
Figura 4.12 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-02.....	114
Figura 4.13 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-03.....	114
Figura 4.14 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-04.....	115
Figura 4.15 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-05.....	115
Figura 4.16 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-06.....	116
Figura 4.17 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-07.....	116
Figura 4.18 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-08.....	117
Figura 4.19 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-09.....	117
Figura 5.1 Modelos geotécnicos contruidos a partir de los sondajes SCPTu para el análisis de estabilidad de taludes en las secciones de análisis (a) 1-1' (b) 2-2' (c) 3-3'	121
Figura 5.2 Mecanismos de falla local y global asociados al factor de seguridad calculado en las secciones de análisis (a) 1-1' (b) 2-2' (c) 3-3'.....	127

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
PGA	Aceleración pico del terreno
ϕ	Ángulo de fricción interna
K_{SAT}	Conductividad hidráulica de un material saturado
γ	Deformación cortante
D_R	Densidad relativa
D_{50}	Diámetro donde pasa el 50% del material
PPD	Ensayo de disipación de presión de poros
SCPT _u	Ensayo de penetración cónica sísmica con medición de presión de poros
σ'_{v0}	Esfuerzo efectivo vertical
σ_{v0}	Esfuerzo total vertical
$\Delta u_2/\sigma'_{v0}$	Exceso de presión de poros normalizado
n	Exponente de esfuerzos
N_{kt}	Factor de normalización del cono para la resistencia cortante no drenada
FS_{LIQ}	Factor de seguridad para la evaluación del potencial de licuación
K_C	Factor de corrección por contenido de finos
CD	Frontera de comportamiento contractivo-dilatante
G_s	Gravedad específica de sólidos
K_G	Índice de rigidez normalizado
I_C	Índice normalizado de comportamiento de suelo
I_B	Índice modificado del comportamiento de suelo
CSL	Línea de estado crítico
$L/h/m^2$	Litro por hora por metro cuadrado
M_W	Magnitud momento
G_0	Módulo de corte máximo
E	Módulo de Young
ψ	Parámetro de estado
λ_{10}	Pendiente de la línea de estado crítico
T_R	Periodo de retorno
T	Periodo en segundos
%	Porcentaje
u_0	Presión de poros en equilibrio
u_2	Presión dinámica de poros
CSR	Relación de esfuerzos cíclicos
K_0	Relación de esfuerzos de reposo <i>in situ</i>
r_u	Relación de exceso de presión de poros

R_f	Relación de fricción
M_{tc}	Relación de fricción crítica
S_u/σ'_{v0}	Relación de resistencia no drenada
$S_{U_{peak}}/\sigma'_{v0}$	Relación de resistencia no drenada pico
$S_{U_{remolded}}/\sigma'_{v0}$	Relación de resistencia no drenada remodelada
$S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$	Relación de resistencia no drenada de fluencia
S_{uLIQ}/σ'_{v0}	Relación de resistencia no drenada licuada
CRR	Relación de resistencias cíclicas
OCR	Relación de sobreconsolidación
e_c	Relación de vacíos en estado crítico
e_0	Relación de vacíos inicial
F_R	Relación normalizada de fricción
B_q	Relación normalizada de presión de poros
q_t	Resistencia corregida del cono
τ	Resistencia cortante
S_U	Resistencia no drenada
$S_{U_{peak}}$	Resistencia no drenada pico
$S_{U_{remolded}}$	Resistencia no drenada remodelada
f_s	Resistencia por fuste o manga
q_c	Resistencia por punta
Q_{tn}	Resistencia por punta del cono normalizada
Q_{t1}	Resistencia por punta del cono normalizada
q_n	Resistencia por punta neta
q_{c1}	Resistencia por punta normalizada
$Q_{tn,cs}$	Resistencia por punta normalizada equivalente a una arena limpia
Q_p	Resistencia por punta normalizada por el promedio de esfuerzos efectivos
S_t	Sensitividad
DBE	Sismo de diseño
MCE	Sismo máximo creíble
SUCS	Sistema unificado de clasificación de suelos
TM	Tamaño máximo de partículas de una muestra de suelo
SBT	Tipo de comportamiento del suelo
SBTn	Tipo de comportamiento del suelo normalizado
V_P	Velocidad de ondas compresionales
V_S	Velocidad de ondas de corte
V_{S30}	Velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El proceso de lixiviación es empleado para la explotación de minerales de baja ley y se compone del pad o plataforma, la pila de lixiviación, pozas de procesos y de emergencias entre los componentes principales. El mineral proveniente del tajo, que puede o no ser triturado, es colocado al volteo en celdas en el interior del pad e irrigado con solución para recuperar los metales. Después de concluido el ciclo de riego, se coloca una capa encima de la anterior y se realiza el mismo proceso formándose la pila de lixiviación. Manrique (2005) indica la necesidad de alcanzar una relación solución/mineral que pueda lograr los objetivos de extracción de metal precioso que es monitoreada según la uniformidad y el taponamiento del sistema de riego, a fin de mantener la calidad de dicho sistema en cada celda de lixiviación y así cumplir con la producción objetivo, poniendo muchas veces en segundo plano aspectos geotécnicos que puedan afectar la estabilidad de la pila de lixiviación. El proceso de lixiviación se debe diseñar buscando un equilibrio entre tres aspectos: tasa de riego de solución química, estabilidad de taludes de la pila ante un escenario estático (drenado y no drenado) y sísmico y la percolación de la solución cianurada.

El tamaño de partículas siempre es motivo de discusión para el metalurgista encargado de la lixiviación, debido a que un menor tamaño permitirá una mejor recuperación de los metales y mayor producción (Laura, 2018), pero a su vez, además del incremento de costos de trituración, hará que el mineral presente un importante contenido de finos y por lo tanto, una menor permeabilidad. Lo anterior demuestra una relación directamente proporcional entre el tamaño máximo del mineral con la percolación e inversamente proporcional al grado de saturación del mineral, ya que en caso de que el mineral se sature, pueden ocurrir problemas de estabilidad, si se inducen condiciones no drenadas a lo largo de las capas de mineral cuya matriz esté dominada por los finos.

Por lo tanto, además de la resistencia del mineral, el parámetro a controlar es la permeabilidad, la que debe presentar un valor de por lo menos un orden de magnitud mayor que la tasa de riego. Por ejemplo, una tasa de riego de 10 L/h/m² equivale a $2,8 \times 10^{-4}$ cm/s, por lo que la permeabilidad del mineral debe ser de por

lo menos $2,8 \times 10^{-3}$ cm/s, lo que permite drenar la solución de lixiviación evitando así la retención de solución y eventualmente su saturación.

El mineral apilado puede presentar granulometrías que llegan a tener un tamaño máximo (TM) desde 4,75 mm (correspondiente a arenas) hasta mayores a 300 mm (mineral que presenta sobretamaños como bloques o bolonerías). Una pila de lixiviación durante su etapa de operación pasa por diferentes ciclos de lixiviación, mediante el riego de una solución que puede generar la degradación del mineral que se puede observar mediante el aumento del contenido de finos, lo que conlleva a la disminución de la permeabilidad afectando a la operatividad de la pila (Valdivia, 2016). En lixiviación de cobre donde se utiliza ácido sulfúrico diluido, el incremento de finos puede llegar hasta un 15%, mientras que en lixiviación de oro y plata en la que se utiliza soluciones cianuradas que esencialmente son básicas, el incremento observado puede ser de hasta 2 a 3%, siendo la clasificación variable entre gravas a arenas. Si el contenido de finos o su reducción por degradación es importante, su clasificación puede ser de arenas limosas o inclusive arenas arcillosas en algunos casos de mediana a alta plasticidad, debido a lo que el riesgo de incremento de la presión de poros se hace evidente predominando un comportamiento no drenado, pudiendo afectar la estabilidad en condiciones estáticas o sísmicas (licuación por flujo o movilidad cíclica según el comportamiento del mineral).

La Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas del Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEN, publicación de guía sin fecha) indica que uno de los objetivos de la preparación del mineral es que sea lo suficientemente fino para que la solución pueda interactuar con los metales presentes en el mineral, pero lo suficientemente grueso para lograr una correcta percolación; por lo que, según la guía, se puede prever que en una pila se pueden generar problemas de inestabilidad por la saturación en el mineral apilado y lixiviado. Por otro lado, la Guía del MINEM indica en su capítulo respecto a la estabilidad física, que los escenarios a considerar son la estabilidad estática y pseudoestática; y además, menciona que por lo general no se realiza el análisis del potencial de licuación por considerar al mineral como un material grueso, pero que debe considerarse un modo de falla potencial cuando el mineral tenga alto contenido de finos (la guía del MINEN no es específica sobre las características físicas del mineral).

La configuración de una pila de lixiviación se compone principalmente de: movimiento de tierras para la nivelación del terreno, instalación de los sistemas de revestimiento y colección de la solución, apilamiento de mineral chancado o ROM, de ser necesario una plataforma o dique de estabilización y el sistema de riego (Van Zyl, 1988); siendo el sistema de revestimiento el que influye en la estabilidad global de la pila mediante fallas de tipo bloque (Lupo, 2010), mientras que las características del mineral y el sistema de riego influirán en la estabilidad a través del cuerpo de la pila. Se debe indicar que la geometría del apilamiento influye directamente a la estabilidad de la pila en cualquier tipo de falla. Además, el cálculo del factor de seguridad se realiza en secciones críticas que permiten llevar a cabo un análisis de forma bidimensional y aproximando el problema a un estado de deformaciones planas, siguiendo una metodología que está basada en el método de equilibrio límite, siendo la más empleada el procedimiento riguroso propuesto por Spencer (1967) para el cálculo de factores de seguridad, que satisface simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio (fuerzas y momentos).

Negrón (2015) caracteriza al mineral lixiviado como una grava (GP-GM, GM, GC-GM) para un proyecto aurífero con alta conductividad hidráulica, donde estimó el comportamiento de este material en condiciones efectivas a partir de ensayos triaxiales consolidados drenados (CD). Se entiende que el análisis no abarca la generación o aumento de contenido de finos del mineral debido a los ciclos de lixiviación, realizando la evaluación de la estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, lo que ha sido muy usual en el pasado con yacimientos de mineral de óxidos de muy buen comportamiento geotécnico; sin embargo, en la última década este tipo de yacimientos se han agotado y cada vez es más frecuente encontrar minerales con alto contenido de finos. Valdivia (2016), en otro proyecto aurífero de lixiviación, clasifica al mineral lixiviado como arena arcillosa con grava (SC) o arena arcillosa-limosa con grava (SC-SM) con contenido de finos y plasticidad promedio de 27% y 7%, respectivamente; los parámetros no drenados fueron estimados a partir de ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) para la evaluación de estabilidad en un escenario postsismo. Los casos citados anteriormente indican que el mineral puede ser caracterizado a partir de ensayos convencionales en muestras tomadas ya sea superficiales o a ciertas profundidades, requiriéndose en algunos otros casos la identificación y caracterización de las zonas licuables y dominadas por finos, siendo necesario en

estos casos la ejecución de sondajes SCPTu para una adecuada caracterización *in situ*.

El 23 de junio del 2001 ocurrió un sismo importante al sur del Perú, que tuvo como epicentro al distrito de Atico. Este sismo, impactó en las instalaciones de dos unidades mineras del sur del Perú, siendo afectadas principalmente sus respectivas pilas de lixiviación. Repetto *et al.* (2003), en su inspección a dichas minas, reportó el caso de licuación en una pila de lixiviación de cobre, que al momento del sismo el mineral aglomerado con un tamaño máximo de 1/2" se encontraba en proceso de lixiviación, siendo en este caso el alto contenido de finos del mineral la causa principal de ocurrencia de licuación. Debido a esto, es necesario conocer aquellas zonas de mineral lixiviado que puedan presentar condiciones de alta saturación donde se puedan generar excesos de presión de poros o solución atrapada a fin de no inferir erróneamente que todo el mineral en proceso de irrigación se encuentra en condiciones no drenadas; además, es imperante en estas condiciones realizar el análisis en condiciones postsismo.

1.2 PROBLEMÁTICA

El mineral de una pila de lixiviación puede tener varias fuentes o procedencias, pudiendo ser de características granulares que permita una adecuada percolación de la solución o dominado por finos donde la percolación libre no se garantiza. La falta del monitoreo y control de la matriz fina del mineral, muy común en las operaciones mineras en el Perú, induce aleatoriedad en sus características físicas y complica la identificación y ubicación de una capa o celda que puede estar dominada por una matriz fina que afecta la confiabilidad del modelo geotécnico que se elabora a través de ensayos de características físicas y propiedades mecánicas para el análisis de estabilidad dada la indefinición de la extensión horizontal y vertical de dichas capas.

La identificación o zonificación de estas capas en una pila es posible a través de la ejecución de ensayos de penetración cónica con medición de presiones de poros (SCPTu), basada en la clasificación del mineral por sus características de comportamiento. Por otro lado, dado que en una pila de lixiviación no se establece un nivel freático en condiciones hidrostáticas sino una condición hidrodinámica generada por las tasas de riego, se dificultará la evaluación del potencial de licuación debido a que la mayoría de métodos simplificados requieren como input

un nivel de agua estable o estático (e.g. Seed & Idriss, 1971), por lo que el perfil de la presión de poros en equilibrio que se pueda definir a partir de sondajes SCPTu pueda incluirse o complementarse a un criterio de evaluación del potencial de licuación propuesto que sea más representativo de una estructura geotécnica como lo es la pila de lixiviación.

La presencia de mineral dominado por finos es un aspecto cada vez más común en las operaciones mineras en el Perú y otros países que gestionan pilas de lixiviación, donde los problemas asociados a las zonas con altos contenidos de finos es en primer lugar, incluir un escenario estático no drenado en la evaluación de la estabilidad de taludes y en segundo lugar la posible licuación de capas de mineral lixiviado que se encuentran sueltos (*sand-like* contractivo) y son de baja permeabilidad o presentan comportamiento similar a una arcilla (*clay-like*).

Debido a lo mencionado anteriormente, el mineral lixiviado que supuestamente es un material de características homogéneas en la pila, mostrará variabilidad en sus características físicas (*i.e.* granulometría, contenido de finos, plasticidad) y mecánicas (*i.e.* resistencia, permeabilidad, si es contractivo o dilatante), divididos en zonas dominadas por finos que generará una condición no drenada y zonas que podrían presentar licuación; por lo que será necesario generar modelos geotécnicos que muestren dicha variabilidad y que permitan evaluar los escenarios más críticos dentro de un análisis de estabilidad de taludes en una pila de lixiviación, que en la práctica, no es común realizarlo para este tipo de estructura.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Debido a que una pila de lixiviación es una estructura que puede alcanzar grandes extensiones, se requiere obtener varias secciones geotécnicas que puedan mostrar la variabilidad de las propiedades del mineral lixiviado; esto podrá lograrse con la ejecución de sondajes SCPTu, que a través de correlaciones, permite estimar el comportamiento mecánico e hidráulico (*i.e.* resistencia, permeabilidad) del mineral lixiviado auscultado y conocer su distribución dentro de la pila, esto a fin de proponer modelos geotécnicos para evaluar la estabilidad de la pila de lixiviación en condiciones no drenadas y postsismo, y así determinar si este tipo de estructura cumple con los estándares nacionales e internacionales con respecto a los factores de seguridad mínimos, además de conocer las

consecuencias de una potencial falla y proponer medidas de control ante una eventual falla de la pila.

1.4 OBJETIVOS

La presente investigación contempla los siguientes objetivos:

1.4.1 Objetivo General

Plantear una metodología para la evaluación de estabilidad de taludes postsismo de una pila de lixiviación a través de la construcción de modelos geotécnicos y caracterización geotécnica del mineral lixiviado según su comportamiento aplicando ensayos SCPTu y sus respectivas correlaciones existentes a fin de obtener parámetros de resistencia y permeabilidad del mineral con énfasis en la identificación del mineral dominado por finos y potencialmente licuable, a fin de abordar escenarios de análisis en condiciones no drenadas y postsismo.

1.4.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se consideran:

- Identificar zonas de mineral con comportamiento tipo *clay-like* y *sand-like* contractivo de baja permeabilidad, según la clasificación de Robertson (2016), que puede retener solución y desarrollar condiciones no drenadas en la pila de lixiviación.
- Identificar, a través del estado *in situ* del mineral lixiviado, zonas de mineral tipo *sand-like* contractivo según el comportamiento de su parámetro de estado (ψ) y según su clasificación de acuerdo con lo propuesto por Robertson (2016), dado que este tipo de material puede desarrollar un escenario de flujo por licuación.
- Evaluar el potencial de licuación de los materiales identificados como *clay-like* y *sand-like*; además, obtener la relación de resistencia no drenada postsismo a través de diferentes metodologías.
- Estimar las propiedades de resistencia cortante de los materiales que intervienen en los modelos geotécnicos.
- Realizar la evaluación de la estabilidad de una pila de lixiviación en condiciones estáticas no drenadas y postsismo.

- Proponer acciones para el control operacional a partir de los resultados del análisis de estabilidad de taludes postsismo.

1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.5.1 Hipótesis General

Es necesario la evaluación de la estabilidad de taludes postismo de pilas de lixiviación donde el mineral apilado proviene de yacimientos mineros con alto contenido de finos, que al presentar variabilidad espacial en sus características geotécnicas, es adecuado capturarlas aplicando ensayos SCPTu.

1.5.2 Hipótesis Específicas

Como hipótesis específicas, se plantea lo siguiente:

- Con la ejecución de ensayos SCPTu en el interior de una pila se puede discretizar el mineral lixiviado en varios tipos de materiales.
- Aplicando ensayos SCPTu se pueden construir modelos geotécnicos caracterizando al mineral según su tipo de comportamiento y no a través de propiedades físicas del mineral.
- A través de ensayos SCPTu, se puede proponer una metodología para la evaluación del potencial de licuación en pilas de lixiviación tomando en cuenta sus características particulares como capas dominadas por material fino y zonas saturadas en lugar de niveles freáticos.
- La evaluación de taludes postsismo de una pila de lixiviación puede ser abordada a través de la aplicación de ensayos SCPTu.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

En el presente capítulo se presenta la teoría y los conceptos clave relacionados con la ingeniería geotécnica (específicamente con sondajes SCPTu, licuación y análisis de estabilidad de taludes), y que serán empleados para desarrollar los objetivos de la aplicación de los ensayos SCPTu en la evaluación de la estabilidad de taludes de una pila de lixiviación.

2.1 INTRODUCCIÓN

Una pila de lixiviación, donde existe la presencia de mineral que presenta contenido de finos mayor a lo usual, por lo general, presenta un grado de incertidumbre asociado a la extensión del mineral dominado por finos en su matriz y que, además, puede ser licuable. Como una alternativa para identificar las zonas anteriormente mencionadas, se pueden realizar ensayos SCPTu que permitirán tener un mayor grado de certeza en la extensión vertical del mineral lixiviado dominado por finos basándose en las características de su comportamiento *in situ* en reemplazo del criterio basado en sus características físicas (*i.e.* curva granulométrica, contenido de gravas, arenas y finos, índice de plasticidad, G_s , entre otras). Por otro lado, teniendo identificadas las zonas dominadas por finos, se requiere conocer cuáles son las zonas que en profundidad pueden ser susceptibles a licuar, y a través de diferentes metodologías (*e.g.* Jefferies y Been, 2016 o Robertson, 2021) se podrán asignar valores de resistencia no drenada residual o postlicuación para la evaluación de la estabilidad de taludes postsismo.

2.2 ENSAYO DE PIEZOCONO SÍSMICO (SCPT_u)

2.2.1 Relaciones básicas

Los modelos geotécnicos serán construidos a partir de los sondajes SCPTu, por lo tanto, se requieren las siguientes definiciones derivadas de las mediciones cónicas y reportadas por Robertson (2009a, 2016). Estas serán utilizadas en relaciones posteriores que ayudarán a cumplir con el objetivo de esta investigación.

- Resistencia total del cono: $q_t = q_c + u_2(1 - a)$
- Relación de fricción: $R_f = \left(\frac{f_s}{q_t} \right) \times 100\%$
- Resistencia normalizada del cono: $Q_{t1} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$

- Relación normalizada de fricción: $F_r(\%) = 100 \times \frac{f_s}{(q_t - \sigma'_{v0})}$
- Relación normalizada de presión de poros: $B_q = \frac{(u - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})}$
- Índice normalizado del SBT: $I_C = [(3,47 - \text{Log}Q_{t1})^2 + (\text{Log}F_r + 1,22)^2]^{0,5}$
- Exponente de esfuerzos (n): $n = 0,381I_C + 0,05 \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0,15$
- Resistencia de cono normalizada (Q_{tn}): $Q_{tn} = \left[\frac{(q_t - \sigma_v)}{p_a} \right] \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n$

Cabe precisar que la relación del área neta del cono (a) es 0,8 y, además, se han adoptado valores constantes de N_{kt} (factor del cono para la resistencia no drenada) así como K_{OCR} (relación de sobreconsolidación) recomendados en la práctica de 14 y 0,33 respectivamente. Finalmente, para el cálculo de esfuerzos verticales se ha adoptado un valor fijo del peso específico de 19 kN/m³.

2.2.2 Características del piezocono sísmico

El ensayo de penetración cónica (CPT) es un método de auscultación del suelo mediante el hincado de un cono de 60° con un diámetro de base, que por lo general es de 10 cm², a una velocidad promedio de 2 cm/s. Al realizarse el hincado se puede registrar la resistencia por punta (q_c) y la resistencia a la fricción o por fuste (f_s) que es el esfuerzo generado alrededor de la manga de fricción que se encuentra por encima del cono. El ensayo CPT, también puede registrar valores de cargas de presión de poros dinámica (u_2) que se registra mediante un sensor envuelto en un filtro poroso saturado que se ubica entre el cono y la manga de fricción (cuando el ensayo registra cargas de presión, se le denomina CPTu); la carga de presión de poros dinámica (u_2) es una respuesta transitoria intersticial del suelo al momento de hincar el cono, por lo que para definir la presión de poros en equilibrio (u_0), que es la que debe usarse en el cálculo de esfuerzos efectivos, será necesario la ejecución de ensayos de disipación. Desde hace muchos años atrás se ha incluido al CPTu un geófono en el mango del cono a fin de registrar velocidades de ondas compresionales (V_p) y de corte (V_s) mediante procedimientos geofísicos, denominándose SCPTu a este tipo de ensayos permitiendo obtener resistencia por punta (q_c), por fuste (f_s), presión dinámica de poros (u_2) y velocidades de ondas P y S. La Figura 2.1 muestra el esquema del SCPTu y los registros que obtiene al desarrollarse el sondaje.

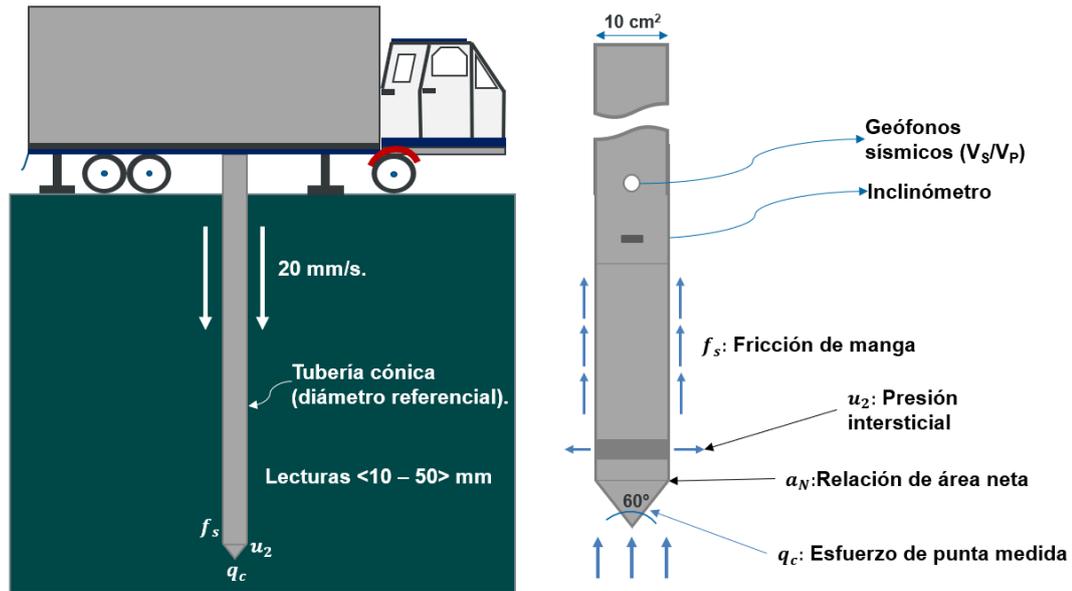


Figura 2.1 Esquemización del sondaje SCPTu. **Fuente:** Elaboración propia.

2.2.3 Interpretación del SCPTu

Los valores de q_c , f_s , u_2 , V_s y V_p obtenidos mediante SCPTu, nos permite, a través de correlaciones, interpretar las características del suelo auscultado según se detalla a continuación:

- Tipo del comportamiento del suelo (SBT, *soil behavior type*, por sus siglas en inglés).
- Estado *in situ* del suelo como densidad relativa (D_R), parámetro de estado (ψ), relación de sobreconsolidación (OCR).
- Resistencia como ángulo de fricción interna pico (ϕ') y resistencia no drenada (S_U).
- Rigidez y compresibilidad como el módulo de corte máximo (G_0), módulo de Young (E) y microestructura (K_G).
- Consolidación y permeabilidad como el coeficiente de consolidación (c_v) y conductividad hidráulica (K_{SAT}).
- Aplicaciones geotécnicas como capacidad portante de cimentaciones superficiales y profundas, mejoramiento de suelos y licuación.

Una de las ventajas de utilizar sondajes SCPTu para clasificar al mineral lixiviado en función de sus características de comportamiento (Robertson, 2009 y

Robertson, 2016) muestran la forma de estimar aproximadamente qué zonas se encuentran en estado contractivo o dilatante y qué mezcla de mineral formado dentro de la pila de lixiviación se comportará como una arena o como una arcilla, de forma independiente a sus características físicas. La Figura 2.2 muestra el tipo de comportamiento del suelo normalizado (SBT_n) propuesto por Robertson (2016) y es la clasificación adoptada en esta investigación.

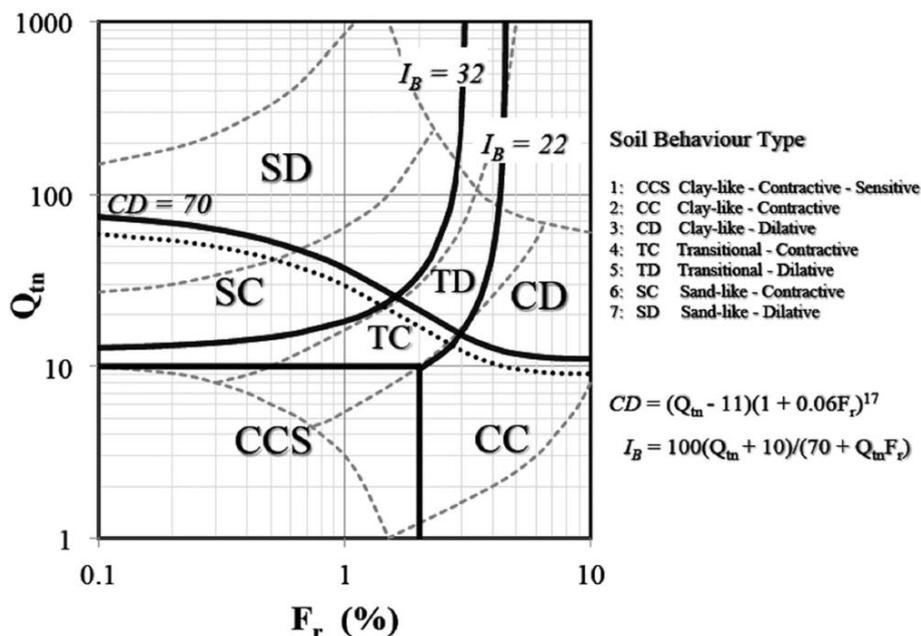


Figura 2.2 Gráfica F_r (%) vs Q_{tn} para determinar el tipo de comportamiento del suelo normalizado (SBT_n). **Fuente:** Robertson, P.K. (2016).

Por otro lado, Schneider *et al.* (2008) presenta una clasificación mediante una gráfica Q_{tn} vs $\Delta u_2/\sigma'_{v0}$ mientras que Schneider *et al.* (2012) presenta una comparación entre las gráficas Q_{tn} vs F_R y Q_{tn} vs $\Delta u_2/\sigma'_{v0}$ en donde se resalta la importancia de considerar la variación de la carga de presión de poros en la clasificación del comportamiento del suelo y su respuesta no drenada. Se debe precisar que estas referencias son confiables en medios donde el suelo esté completamente saturado o donde el sensor en el piezocono se encuentre saturado en todo momento de la auscultación, siendo este caso más apropiado para obras *offshore* como puertos o en una presa de agua o relaves donde se conoce un régimen de flujo estable, mientras que para una pila de lixiviación para establecer su confiabilidad se deberá ejecutar una cantidad importante de ensayos de disipación de presión de poros y encontrar condiciones de flujo irreales para este

tipo de estructuras. Por lo tanto, la clasificación propuesta por Robertson (2016) será la empleada para cumplir los objetivos de la presente investigación.

Respecto a la evaluación del potencial de licuación, existen metodologías que emplean los resultados de los ensayos CPT como Robertson y Wride (1998), Youd *et al.* (2001), entre otros. La curva del desencadenamiento de la licuación se basa en lo propuesto por Robertson y Wride (1998) donde propone la variación de la curva de licuación según el contenido de finos (ver Figura 2.3) para un $M_w = 7,5$ y normalizada a $\sigma'_{v0} = 1$ atm.

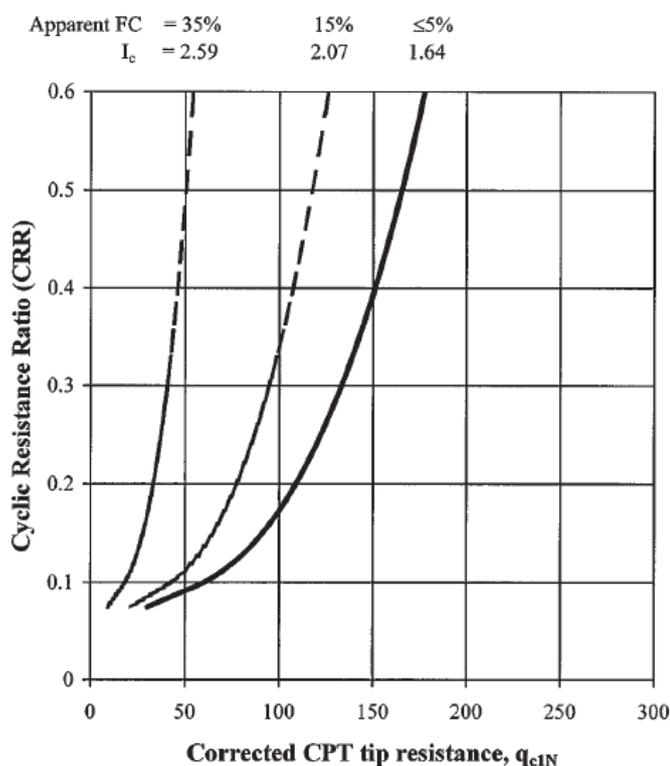


Figura 2.3 Curvas de la variación del CRR respecto a la resistencia por punta corregida según el contenido de finos aparente. **Fuente:** Robertson, P.K y Wride, C.E. (1998).

Además, a partir de los registros de los sondajes SCPTu se pueden obtener el parámetro de estado (ψ) y la relación de resistencia no drenada licuada (S_{uLIQ}/σ'_{v0}) siguiendo metodologías que serán especificadas en acápites posteriores.

2.2.4 Ensayo de disipación de presión de poros

Para el cálculo del esfuerzo efectivo vertical (σ'_{v0}) se requiere de la estimación del perfil de presión de poros en equilibrio (u_0) que puede estimarse mediante pruebas

de disipación de presión de poros (PPD, por sus siglas en inglés). En una pila de lixiviación, el régimen de flujo es transitorio debido a la acción del riego de solución, por lo que no se espera un nivel de agua (con una altura muy por encima a los 2 o 3 m sobre la geomembrana del pad de lixiviación) sino un perfil con diferentes presiones de poros en equilibrio, siendo los ensayos PPD de importancia para definir dicho perfil. Por ejemplo, en la Figura 2.4 se muestra el desarrollo de un ensayo de disipación en una pila de lixiviación a una profundidad de 16 m ($\sigma'_{v0} \sim 320$ kPa) donde se observa el desarrollo de la carga de presión de poros hasta un punto máximo y luego disminuir hasta alcanzar una carga de presión en equilibrio aproximado de 5,9 kPa.

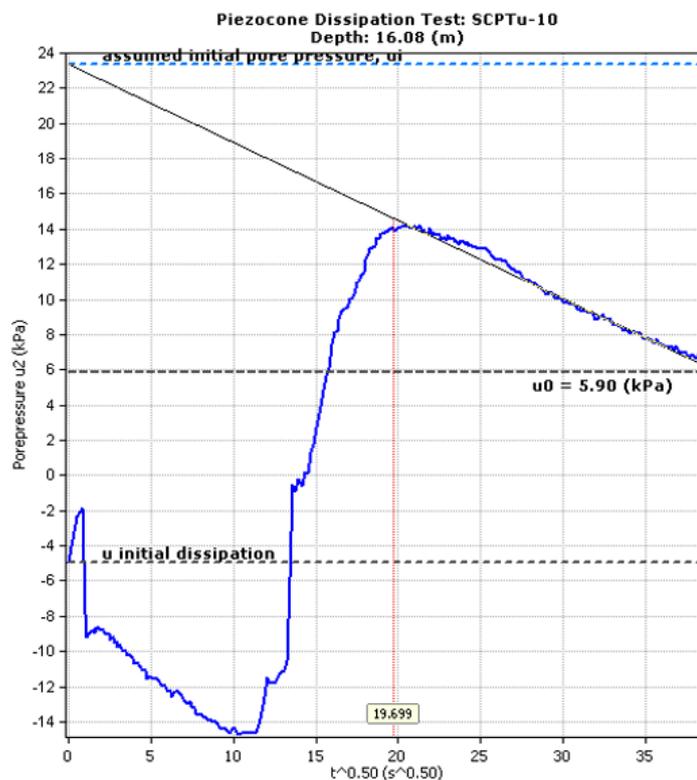


Figura 2.4 Ensayo PPD en pila de lixiviación. **Fuente:** Captura de procesamiento de un ensayo PPD con CPeT-IT. Elaboración propia.

2.3 TEORÍA DEL ESTADO CRÍTICO

Desarrollada con el objetivo de representar el comportamiento del suelo desde un punto de vista mecánico para clasificar la respuesta del material ante esfuerzos aplicados como frágil o dúctil. El estado crítico, o último, de un suelo es alcanzado cuando ante un esfuerzo constante éste sigue deformándose sin mostrar variaciones volumétricas representadas por la relación de vacíos de la muestra. A

partir de ensayos triaxiales que alcanzan el estado último, es posible trazar un lugar geométrico de estos puntos alcanzados desde diferentes estados de esfuerzo inicial para una misma muestra de suelo. Este lugar geométrico puede ser representado por una línea o curva denominada línea de estado crítico (CSL; *Critical State Line*, en inglés) que es única para la muestra de suelo seleccionada y trazada en el espacio e - $\ln(p')$. El estado volumétrico del suelo se representa por su relación de vacíos (e_0) para un esfuerzo vertical inicial dado (p'_0) y la diferencia entre esta con aquella obtenida en su estado último (e_f o e_c), trazada en la CSL, se define como parámetro de estado ($\Psi=e_0-e_c$). La CSL es la base para analizar si un suelo puede presentar licuación a partir de la teoría del estado crítico. Si la e_0 es mayor que la e_f ($\Psi>0$) entonces el suelo se encuentra en estado contractivo y puede desarrollar un ablandamiento deformacional súbito o incremental. Un suelo en estado contractivo puede emplearse como un indicador de una posible ocurrencia de flujo por licuación o en su defecto, de licuación cíclica. Por otro lado, si la e_0 es menor que la e_f ($\Psi<0$) se debe evaluar la posible ocurrencia de licuación cíclica, de movilidad cíclica o de una respuesta dúctil ante una carga cíclica. La Figura 2.5 bosqueja la CSL e ilustra la definición del Ψ .

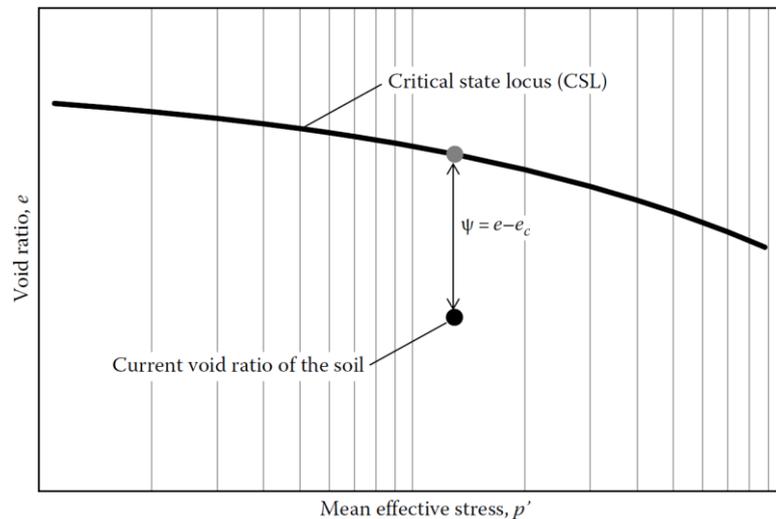


Figura 2.5 CSL y definición del ψ . **Fuente:** Jefferies, M. y Been, K. (2016).

2.3.1 Estimación del parámetro de estado

Estimar el ψ en el mineral de una pila de lixiviación es complicado dado que formalmente este se calcula mediante una CSL para condiciones idealizadas de una muestra preparada en laboratorio, es por ello que muchas veces se prefiere el uso de correlaciones empíricas que se ajusten al caso estudiado y a las

mediciones que se pueden realizar *in situ* en la pila, como es el caso de las obtenidas a través de sondajes SCPTu.

Las metodologías a seguir en la presente investigación son: 1) Plewes *et al.* (1992) que incluye la compresibilidad del suelo al ψ a través del λ_{10} (pendiente de la CSL) utilizando las formulaciones propuestas por Been *et al.* (1987) y la gráfica $Q(1 - B_q)$ vs F_r (%) propuesta por Jefferies y Davies (1991) y que es resumido e implementado por Shuttle y Cunning (2008) (ver Figura 2.6); 2) Robertson (2010b) que propone curvas aproximadas del ψ que se relacionan con la Q_{tn} empleando el tipo de comportamiento del suelo normalizado (SBT_n) en el diagrama Q_{tn} - F_r (ver Figura 2.6).

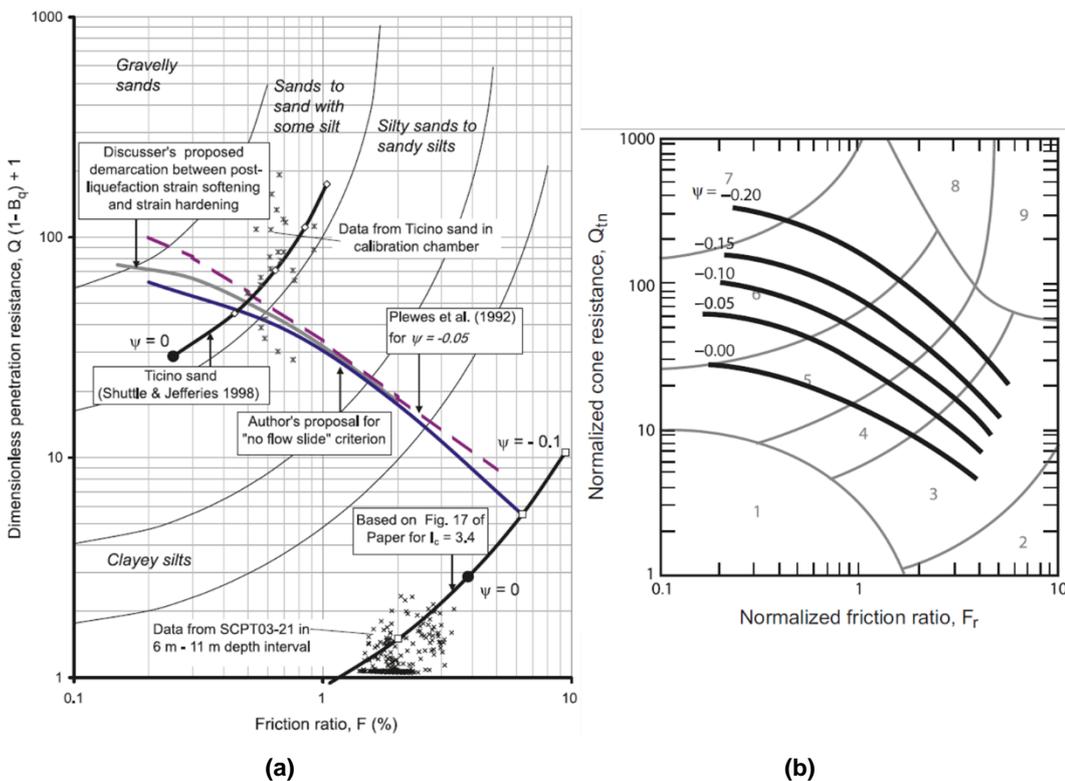


Figura 2.6 (a) Actualización de la figura del tipo de comportamiento del suelo modificado a fin mostrar el potencial de flujo por licuación. **Fuente:** Shuttle y Cunning (2008) (b) Contornos para la estimación del ψ a partir del gráfico Q_{tn} - F_r . **Fuente:** Robertson (2010b).

De acuerdo con Robertson (2010b), generalmente los suelos con un estado más suelto o disgregado que su estado crítico ($\psi > 0$) presentará un comportamiento contractivo y su resistencia cortante no drenada se verá disminuida al movilizar su

resistencia conforme se incrementa la deformación cortante del suelo (*strain softening*). Robertson (2010c), Shuttle y Cuning (2007) y Jefferies y Been (2016) sugirieron que cuando un suelo presenta un parámetro de estado $\psi > -0,05$, se espera la pérdida de resistencia en condición no drenada acorde a un comportamiento *strain softening*. Por lo tanto, la frontera $\psi = -0,05$ puede ser tomada como una primera aproximación y es recomendada en la literatura técnica para discernir con respecto a la susceptibilidad al flujo por licuación que podría presentar el mineral de la pila de lixiviación a evaluar en la presente investigación.

2.3.1.1 Formulación propuesta por Plewes et al. (1992)

El método propuesto por Plewes et al. (1992) es uno de los adoptados por Jefferies y Been (2016) para estimar el ψ (a partir de sondajes SCPTu) de materiales con comportamiento *sand-like* o *clay-like*, donde toma en cuenta la condición de drenaje del material mediante la expresión $Q_p(1-B_q)$. Este método se relaciona con la teoría del estado crítico a través del M_{tc} y λ_{10} (ver Figura 2.7).

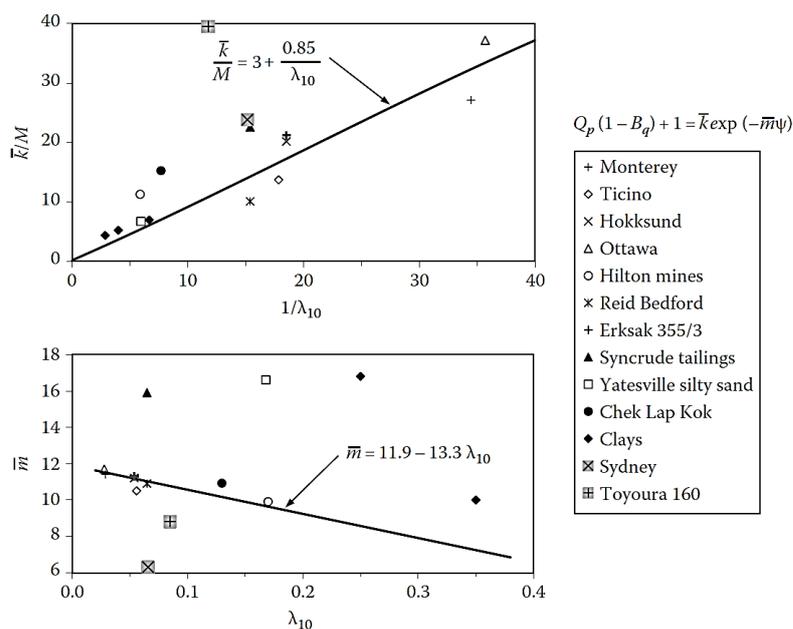


Figura 2.7 Tendencias entre los parámetros \bar{k} y \bar{m} con el λ_{10} . **Fuente:** Jefferies y Been (2016).

Las ventajas que muestra esta metodología, que si bien fue propuesta inicialmente para dar una primera revisión del estado *in situ* del suelo, resultó ser muy útil debido a la relación que muestra el λ_{10} con la compresibilidad del suelo

caracterizado por la relación de fricción normalizada $F(\%)$ según lo mostrado en la Figura 2.8.

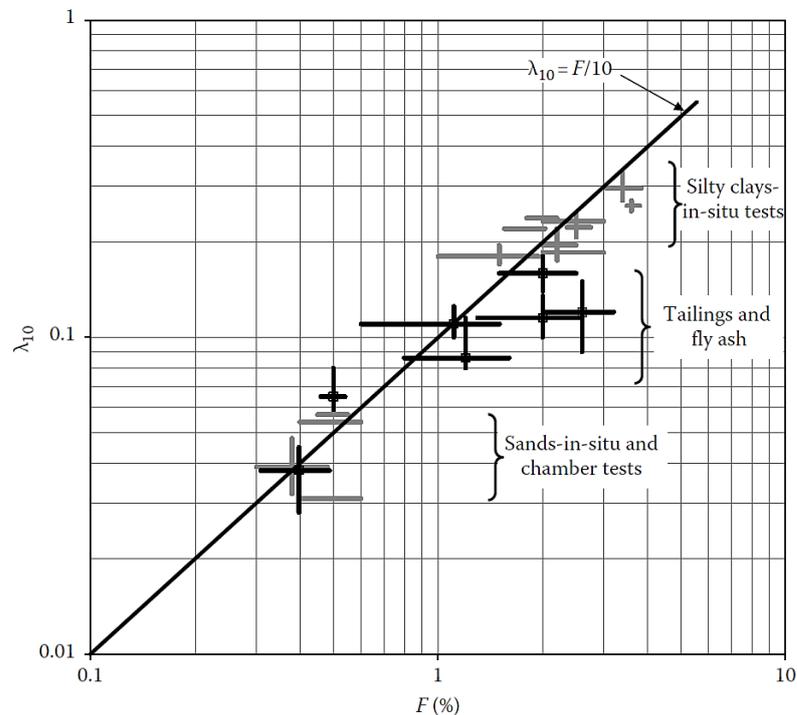


Figura 2.8 Relación entre λ_{10} y $F(\%)$ sugerida por Plewes *et al.* (1992). **Fuente:** Jefferies y Been (2016).

A continuación, se detalla la secuencia de cálculo para obtener el ψ según Plewes *et al.* (1992) a partir de los sondajes SCPTu:

- Cálculo de los esfuerzos efectivos (σ'_{v0}) registrados en los SCPTu.
- A partir de los registros q_c , f_s , u_2 , los perfiles de esfuerzos efectivos (σ'_{v0}) y de presión de poros en equilibrio (u_0) se estimarán los siguientes parámetros normalizados:

$$Q_p = \frac{3(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}(1 + 2K_0)}$$

$$F_R(\%) = 100 \times \frac{f_s}{(q_t - \sigma'_{v0})}$$

$$B_q = \frac{(u - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})}$$

- Cálculo del λ_{10} a través de la ecuación presentada en la Figura 2.8.

$$\lambda_{10} = \frac{F(\%)}{10}$$

- Cálculo de los parámetros \bar{k} y \bar{m} según las correlaciones mostradas en la Figura 3.18. Se debe precisar que el M_{tc} requerido en las formulaciones se adoptará de lo descrito en el acápite 3.5.1.1.2, tomando el valor de 1,304.

$$\bar{k} = M_{tc} \left(3 + \frac{0.85}{\lambda_{10}} \right)$$

$$\bar{m} = 11.9 - 13.3\lambda_{10}$$

- Cálculo del parámetro de estado ψ según la metodología propuesta por Plewes *et al.* (1992).

$$\psi = \frac{-\ln\left(\frac{Q_p(1 - B_q) + 1}{\bar{k}}\right)}{\bar{m}}$$

2.3.1.2 Formulación propuesta por Robertson (2010b)

Robertson (2010b) sugiere que utilizar el ψ es más confiable en arenas que presentan compresibilidad que la densidad relativa (D_r), por lo que propuso obtenerlo relacionándolo con la $Q_{tn,cs}$. La ventaja es que se relaciona con el SBT mediante el I_c y además normaliza mediante el exponente de esfuerzos (n) que varía según el SBT.

A continuación, se detalla la secuencia de cálculo para obtener el ψ según Robertson (2010b) a partir de los sondajes SCPTu:

- A partir de los registros q_c , f_s , u_2 , los perfiles de esfuerzos totales y efectivos (σ_{v0} , σ'_{v0}) y de presión de poros en equilibrio (u_0) se estimarán los parámetros normalizados Q_{t1} y $F_r(\%)$ según las formulaciones presentadas en el acápite 3.4.1.
- A partir de los parámetros normalizados, se calculan los parámetros I_c , n y Q_{tn} según las formulaciones presentadas en el acápite 2.2.1 (tomando en cuenta que para $I_c > 3$ se considera un valor de $n=1$ y presión atmosférica de 100 kPa).
- Cálculo del factor de corrección del suelo (K_c). En este caso, se ha tomado lo reformulado por Robertson (2021):

- o Si $I_C \leq 1,70$:

$$K_C = 1$$

- o Si $1,7 < I_C < 3,0$:

$$K_C = 1,8346I_C^5 - 23,673I_C^4 + 124,02I_C^3 - 320,616I_C^2 + 405,82I_C - 199,97$$

- Obtener los valores $Q_{tn,cs}$:

$$Q_{tn,cs} = K_C Q_{tn}$$

- Por último, cálculo del ψ :

$$\psi = 0,56 - 0,33 \log Q_{tn,cs}$$

2.4 LICUACIÓN

2.4.1 Flujo por licuación

Olson (2001) define al flujo por licuación como el ablandamiento por deformación (*i.e.* strain-softening) de suelos contractivos, saturados o cerca a la saturación y en su mayoría no cohesivos (como arenas y limos) bajo una deformación por corte no drenada y este ocurre cuando el esfuerzo cortante estático aplicado al suelo es mayor que la resistencia cortante no drenada residual. Una de las principales características de este tipo de licuación es que puede ser activado por una carga monotónica, así como una sísmica, produciéndose una falla asociada a grandes deformaciones, que según Robertson (2010c), puede originarse movimientos que se deben a los esfuerzos internos inducidos por el propio peso del suelo y que ocurren inmediatamente después del evento desencadenante.

El comportamiento del flujo por licuación se puede describir a través de un diagrama de trayectorias de esfuerzos p' - q que se acerca a la superficie de falla (línea recta de pendiente igual a la relación de fricción crítica, M_{fc} , obtenida a partir de la teoría de estado crítico) haciendo que el esfuerzo efectivo disminuya más rápidamente mientras más se acerque a dicha superficie, tal como se muestra en la Figura 2.9.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, el flujo por licuación requiere de ciertas características físicas como ser un material suelto de baja o nula plasticidad y de un medio saturado o uno muy cercano a la saturación para desencadenar licuación, además de ser considerada como una de las fallas más catastróficas

debido a las grandes deformaciones que se originan bajo este escenario, por lo que, para fines de la presente investigación, será necesario identificar el mineral lixiviado dominado por finos capaz de retener solución y desarrollar cargas de exceso de presión de poros y que a su vez sea contractivo y presente baja o nula plasticidad.

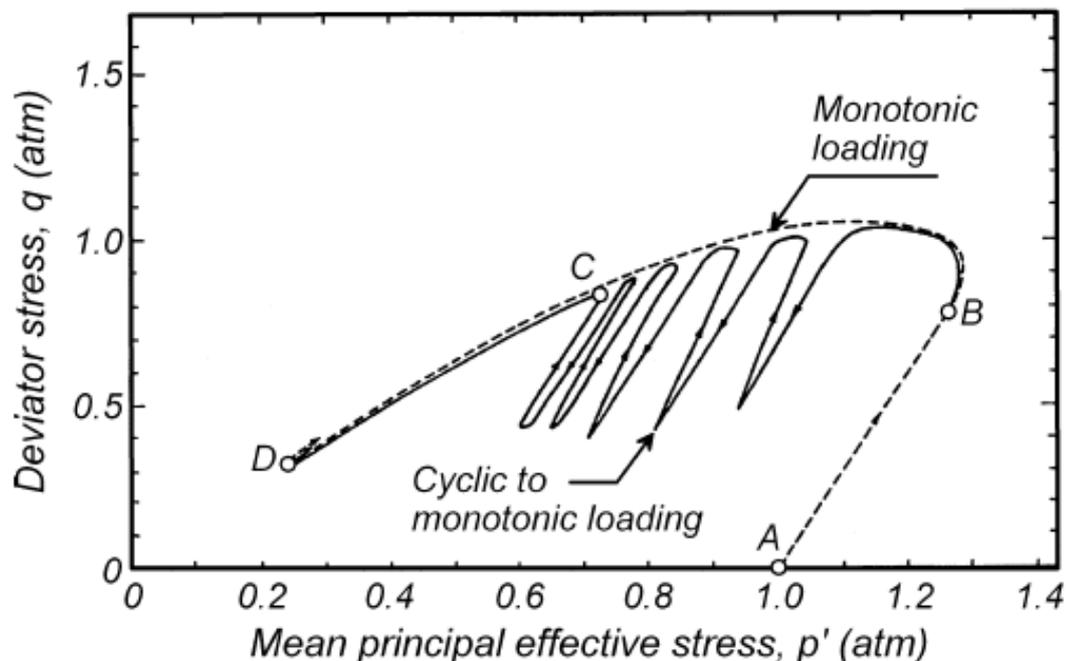


Figura 2.9 Comportamiento no drenado en una arena suelta. **Fuente:** Idriss y Boulanger (2008).

2.4.2 Licuación y movilidad cíclica

Bajo la aplicación de una carga sísmica, el suelo puede presentar 02 tipos de condiciones:

- Licuación cíclica, donde, según lo definido por Robertson y Wride (1998), los esfuerzos cortantes estáticos son menores a los esfuerzos cíclicos y mayores a la resistencia última después de la aplicación de la carga cíclica. Tiende a presentar un ablandamiento representado a través de la disminución progresiva de la rigidez del suelo en el caso que este sea denso, a diferencia de una falla súbita y frágil que ocurren en suelos sueltos bajo un escenario de flujo por licuación; *i.e.* cuando un elemento del suelo alcanza, por la inversión de los esfuerzos cortantes, la condición de esfuerzo efectivo prácticamente nulo, el suelo presentará muy poca rigidez originando grandes deformaciones durante la carga cíclica. La Figura 2.10

muestra el diagrama de trayectoria de esfuerzos p' - q y los lazos histeréticos de una arena bajo licuación cíclica.

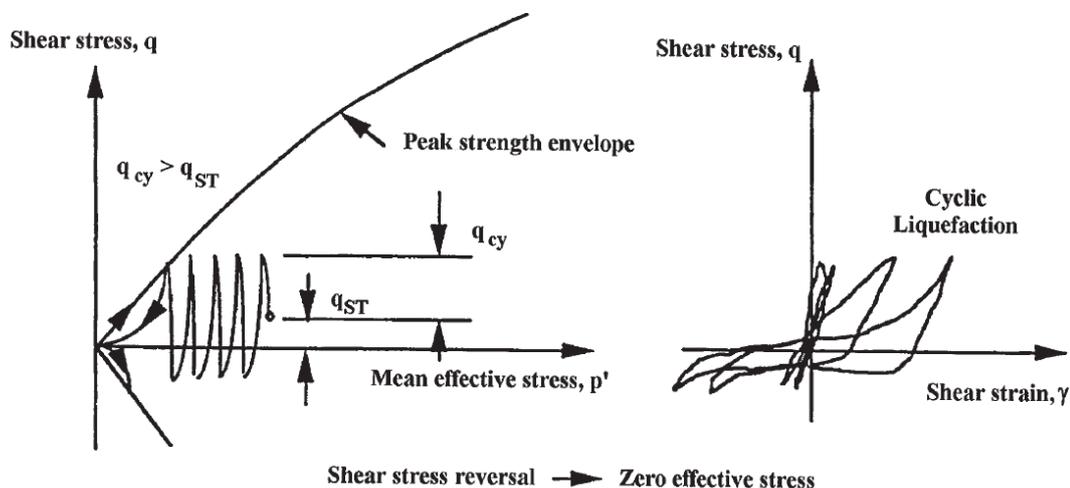


Figura 2.10 Comportamiento de una arena bajo una carga cíclica que desarrolla licuación cíclica. **Fuente:** Robertson y Wride (1998).

- Movilidad cíclica, en este caso no se desarrolla la inversión de esfuerzos cortantes por lo que no se logra el esfuerzo efectivo nulo, originándose de esta forma deformaciones limitadas, siempre que la relación de vacíos inicial del suelo esté por debajo de la CSL (*i.e.* $\psi < 0$), obteniendo como respuesta del suelo un endurecimiento por deformación (*i.e.* *strain - hardening*). En este tipo de comportamiento, la rigidez disminuye paulatinamente y las deformaciones son menores a las generadas en la licuación cíclica. La Figura 2.11 muestra un esquema del comportamiento del suelo bajo movilidad cíclica.

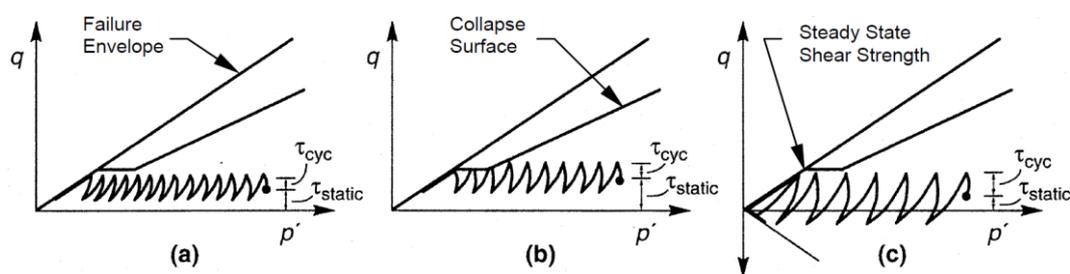


Figura 2.11 Comportamiento de un suelo bajo una carga cíclica que desarrolla movilidad cíclica. (a) sin inversión de esfuerzos cortantes y los esfuerzos combinados estático y cíclicos son menores que la resistencia en estado constante. (b) sin inversión de esfuerzos cortantes y en algunos ciclos los esfuerzos combinados estático y cíclicos son mayores a la resistencia en estado constante. (c) con inversión de esfuerzos cortantes y los esfuerzos combinados

estático y cíclicos son menores que la resistencia en estado constante. **Fuente:** Olson (2001).

2.4.3 Susceptibilidad y evaluación del potencial de licuación

De acuerdo con el actual estado de la práctica es común realizar análisis de susceptibilidad a la licuación mediante características físicas, siguiendo las recomendaciones de diversas metodologías como las propuestas por Seed *et al.* (2003), Bray y Sancio (2006), Idriss y Boulanger (2006), Armstrong y Malvick (2016), entre otras. Considerando que para un mineral que presenta características no homogéneas como los minerales de una pila de lixiviación, la evaluación de la susceptibilidad mediante características físicas no es la más adecuada debido a que este tipo de información no captura el comportamiento *in situ* del mineral lixiviado; por lo que se hace necesario evaluar el potencial de licuación mediante enfoques que tomen en cuenta parámetros obtenidos a través de sondajes SCPTu como el enfoque del parámetro de estado (ψ) siguiendo las recomendaciones de Jefferies y Been (2016) o el enfoque de resistencia y esfuerzos cíclicos siguiendo las metodologías propuestas por Youd *et al.* (2001), Robertson (2010c) o Boulanger e Idriss (2014). Sin embargo, evaluar la susceptibilidad a la licuación puede tomarse como antecedente o de modo referencial a fin de respaldar la aplicación de metodologías más rigurosas.

2.5 RESISTENCIA CORTANTE NO DRENADA

La resistencia no drenada se genera cuando se aplica una carga a un suelo saturado sin permitirle el drenaje produciéndose un exceso de presión de poros de carácter permanente. Este tipo de resistencia puede ser representada por su valor pico o residual, suponiendo una respuesta frágil del suelo. Para suelos de respuesta dúctil es necesario definir una deformación de referencia para asignar un valor de resistencia ya que no se alcanza un valor pico dado el desempeño incremental de su resistencia. La definición de resistencia en condición no drenada es teórica dado que una condición de ese tipo es una idealizada y en la práctica esta es aplicada sin distinción cuando el suelo presenta una baja permeabilidad tal que, bajo una ventana de tiempo suficientemente mayor que aquella en la que se le aplica una carga, se induce un exceso de presión de poros que tarda en disipar y que son consideradas para fines del análisis como permanentes.

2.5.1 Relación de resistencia no drenada remodelada

La relación de resistencia no drenada remodelada ($S_{u\text{remolded}}/\sigma'_{v0}$) se define como la resistencia luego de aplicar una tasa de deformación, remodelo o alguna modificación en su estado *in situ*, en condiciones no drenadas. En materiales *clay-like* que presenta sensibilidad (S_t), la remodelada representa a la resistencia pico dividida entre el grado de sensibilidad.

Por lo expuesto, los valores de sensibilidad de los ensayos SCPTu pueden ser obtenidos de manera empírica para así estimar un valor de resistencia no drenada remodelada ($S_{u\text{remolded}}$). Robertson (2009a) sugirió que la sensibilidad (S_t) en los suelos arcillosos ideales puede ser estimada en función del F_R (%). A continuación, se muestra la relación de la sensibilidad con la relación de fricción:

$$S_t = \frac{7,1}{F_R}$$

La relación de resistencia inalterada no drenada es calculada a través de la siguiente correlación empírica:

$$\frac{S_{u\text{peak}}}{\sigma'_{v0}} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{(\sigma'_{v0})(N_{kt})} = \frac{Q_t}{N_{kt}}$$

Donde el Q_t es la resistencia normalizada por punta y el N_{kt} corresponde a un número adimensional de resistencia cortante asignada a suelos finos o arcillosos. A continuación, se muestra la correlación para la relación de resistencia no drenada remodelada:

$$\frac{S_{u\text{remolded}}}{\sigma'_{v0}} = \frac{f_s}{\sigma'_{v0}} = \frac{(F \cdot Q_t)}{100} = \frac{F_R \cdot S_{u\text{peak}} \cdot N_{kt}}{100 \cdot \sigma'_{v0}}$$

2.5.2 Relación de resistencia no drenada de fluencia ($S_{u\text{(yield)}}/\sigma'_{v0}$)

Utilizada para evaluar la condición de un suelo antes de desencadenar licuación. La resistencia cortante no drenada de fluencia ($S_{u\text{(yield)}}/\sigma'_{v0}$), según Olson y Stark (2003), se define como aquella disponible durante la carga sin drenaje. Esta se estima por medio de una correlación con base en historias de caso de fallas de flujo por licuación inducidas por deformación resultante de carga estática o cíclica. La Figura 2.12 esquematiza la respuesta no drenada bajo una carga estática y sísmica.

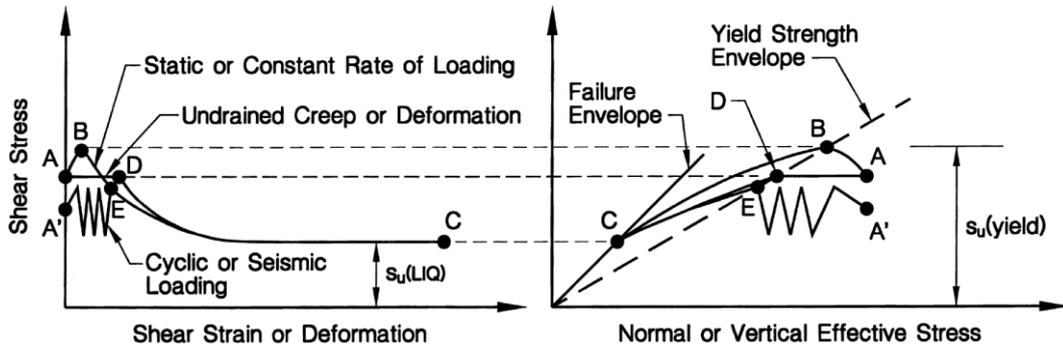


Figura 2.12 Esquema de la respuesta no drenada bajo una carga estática o sísmica de un suelo arenoso, contractivo y saturado en términos de deformación cortante y de esfuerzo efectivo vertical o normal. **Fuente:** Olson y Stark (2003).

2.5.3 Resistencia residual o resistencia licuada

Materiales como arenas sueltas o contractivas que presentan comportamiento *strain-softening* llegan a presentar una resistencia mínima constante a diferentes niveles de deformación, como la presentada en la Figura 2.13, que es llamada como resistencia residual o licuada. Olson (2001) define a la resistencia licuada como la movilizada a gran deformación después del flujo por licuación (*strain - softening* en condiciones no drenadas) y que puede ser normalizada con el esfuerzo vertical efectivo antes de la falla para obtener la relación de resistencia licuada (S_{uLIQ}/σ'_{v0}).

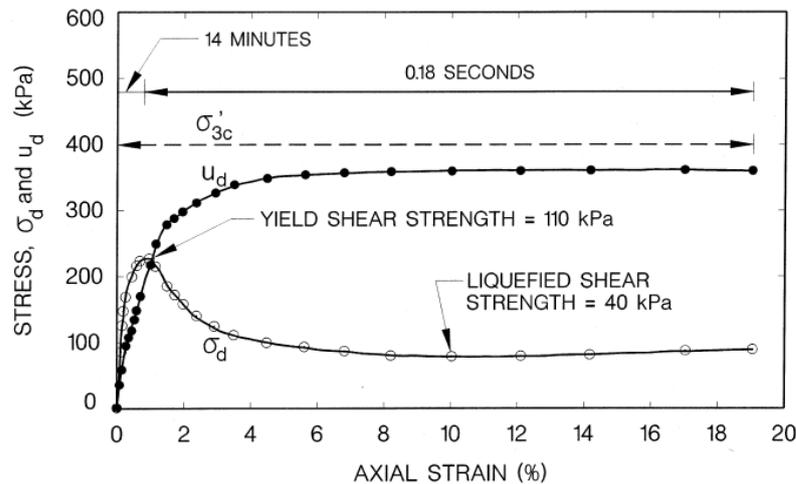
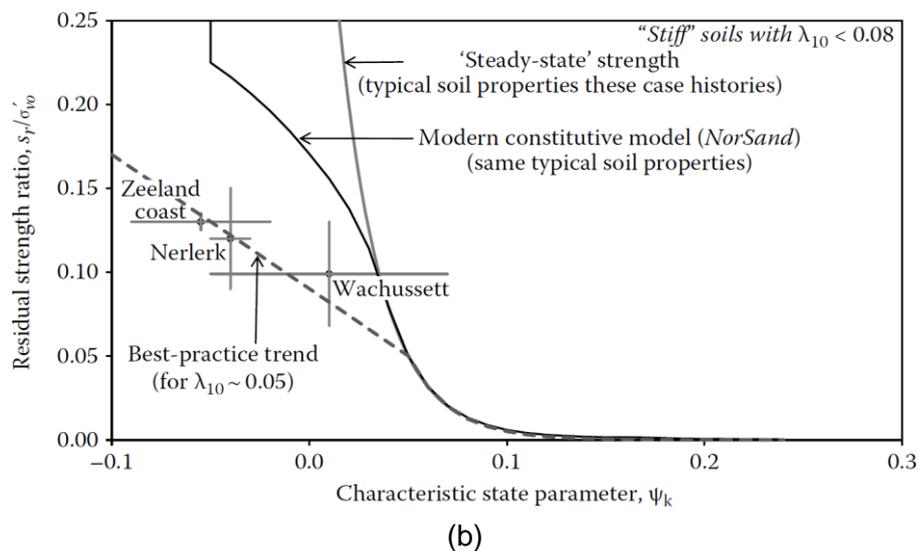
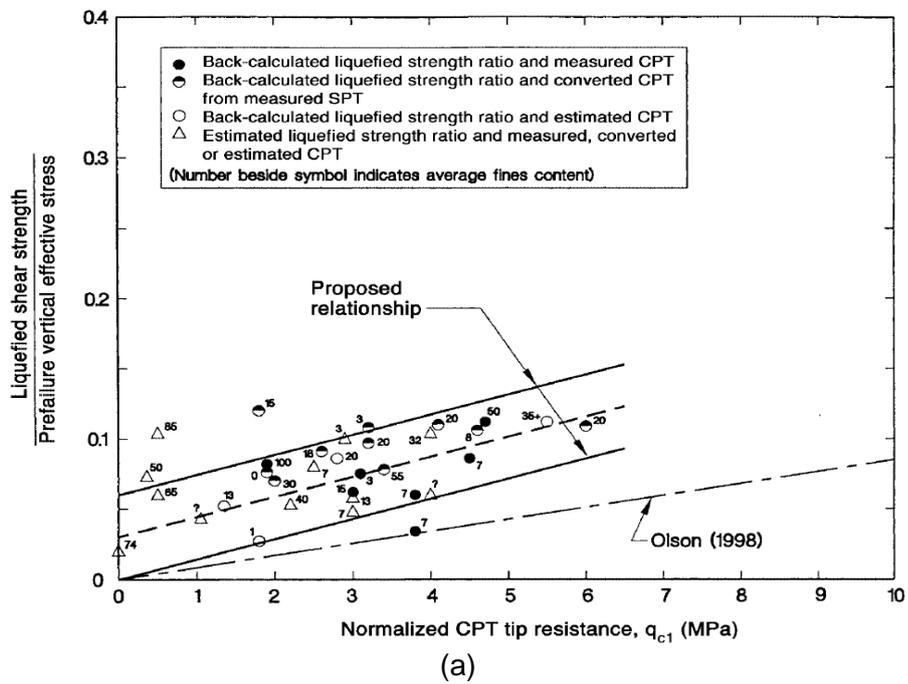


Figura 2.13 Gráfica esfuerzo-deformación y respuesta de la presión de poros durante una prueba de compresión monotónica sin drenaje en arena suelta. Donde σ'_d es el esfuerzo desviador y u_d es el exceso de presión de poros inducidos por el corte. **Fuente:** Olson (2001).

En la presente investigación, para obtener la resistencia residual a través de los registros de ensayos SCPTu, se abordará las formulaciones propuestas por Olson y Stark (2003), Jefferies y Been (2016) y Robertson (2021), cuyas correlaciones se muestran en la Figura 2.14 y están sustentadas a partir de casos-historia de fallas por flujo por licuación. Este tipo de resistencia se desarrolla cuando el material ya ha fallado o licuado, por lo que se suele adoptar para evaluación de estabilidad de taludes postsismo a fin de superar un factor de seguridad mínimo y así cumplir criterios de estabilidad, dado que estabilizar alguna estructura geotécnica para un escenario postsismo puede resultar económicamente más favorable que remediar los impactos negativos de una falla por flujo por licuación.



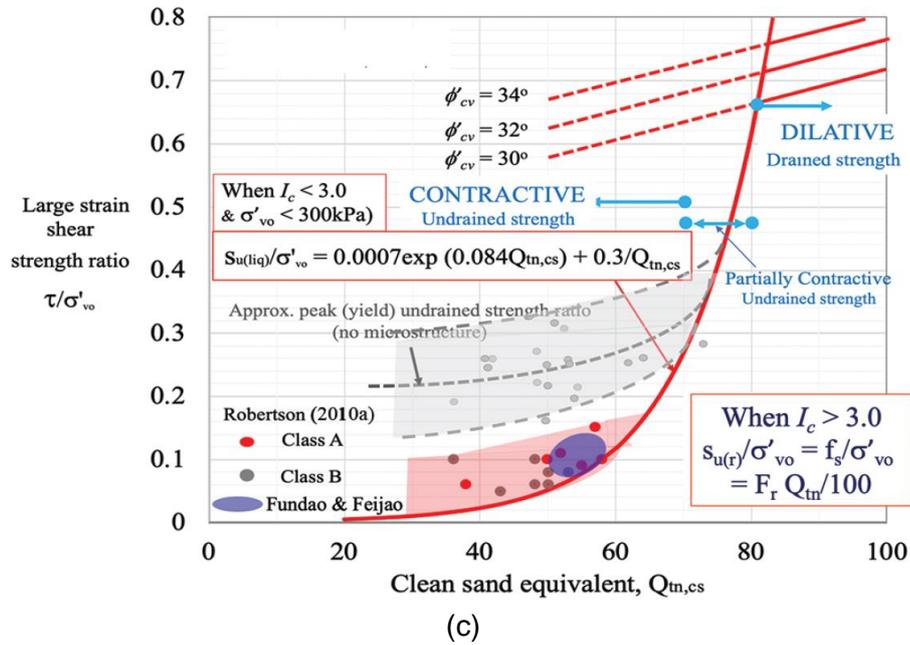


Figura 2.14 Correlaciones para obtener S_{uLIQ}/σ'_{v0} a través del ensayo CPT. **Fuentes:** (a) Olson (2002), (b) Jefferies y Been (2016), (c) Robertson (2021).

2.5.3.1 Formulación propuesta por Olson y Stark (2002)

Fue propuesta a partir de retroanálisis de casos históricos de fallas por flujo por licuación activadas de forma estática, dinámica y por deformación. Olson y Stark (2003) presentaron una correlación de la S_{uLIQ}/σ'_{v0} con la resistencia por punta corregida normalizada (q_{c1}) que se muestra a continuación:

$$\frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = 0,03 + 0,0143(q_{c1}) + 0,03 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6,5 \text{ MPa}$$

2.5.3.2 Formulación propuesta por Jefferies y Been (2016)

La formulación propuesta por Jefferies y Been (2016) se realizó bajo el enfoque del parámetro de estado, y en consecuencia bajo la teoría de estado crítico; por lo que la S_{uLIQ}/σ'_{v0} se encuentra relacionada con el estado *in situ* del suelo y su clasificación como material contractivo o dilatante.

Para determinar la relación de resistencia residual, en primer lugar, se deberá hallar el ψ mediante Plewes *et al.* (1992) y luego se calcula S_{uLIQ}/σ'_{v0} mediante la siguiente formulación:

$$\frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) \left(\frac{M_{tc}}{2} \right) e^{-\frac{\psi}{\lambda_e}}$$

Donde K_0 adopta el valor de 0,7 mientras que M_{tc} el valor de 1,304. Por otro lado, λ_{10} es 2,3 veces el valor de λ_e .

2.5.3.3 Formulación propuesta por Robertson (2021)

Robertson (2021) propone su formulación para suelos clasificados como contractivos ($CD < 70$) según Robertson (2016), diferenciando el cálculo de la S_{uLIQ}/σ'_{v0} entre materiales del tipo *sand-like* y transicionales ($I_C < 3,0$) del tipo *clay-like* ($I_C > 3,0$). Además, esta formulación se relaciona con el comportamiento del suelo (SBT) a través de la resistencia por punta normalizada equivalente a arenas limpias ($Q_{tn,cs}$), siendo esta una ventaja al momento de caracterizar modelos geotécnicos.

A continuación, se detalla la secuencia de cálculo y sus respectivas consideraciones:

- A partir de los registros q_c , f_s , u_2 , los perfiles de esfuerzos totales y efectivos (σ_{v0} , σ'_{v0}) y de presión de poros en equilibrio (u_0), se calcula la frontera contractiva-dilatante (CD), $F_R(\%)$ y $Q_{tn,cs}$ según las formulaciones indicadas en acápites anteriores.
- Si $CD < 70$, $I_C < 3$ y $Q_{tn,cs} < 80$, la resistencia licuada S_{uLIQ}/σ'_{v0} se obtiene con la siguiente formulación:

$$\frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = 0,0007e^{0,084Q_{tn,cs}} + \frac{0,3}{Q_{tn,cs}}$$

- Si $I_C > 3$ y $CD < 70$:

$$\frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = \frac{F_R Q_{tn}}{100}$$

- Se adopta los siguientes valores límites para $CD < 70$:

$$\frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = 0,02 \text{ para } Q_{tn,cs} < 20 \wedge \frac{S_{uLIQ}}{\sigma'_{v0}} = 0,30 \text{ para } Q_{tn,cs} > 80$$

Las formulaciones muestran que esta metodología es aplicable a suelos contractivos, lo que es coherente dado que este tipo de material puede desarrollar flujo por licuación.

2.6 ESTABILIDAD DE TALUDES POSTSISMO

Una pila de lixiviación se conforma a través de varias capas de mineral que se apilan con alturas similares dejando una banqueta que permite conformar el talud global de la pila. Debido al impacto que puede generar la falla de la pila, se requiere evaluar la estabilidad del diseño propuesto mediante uno o varios métodos, siendo el más utilizado el método de equilibrio límite.

El análisis de estabilidad de taludes consiste en resolver ecuaciones de equilibrio estático para obtener un factor de seguridad aceptable, definido como la relación entre la resistencia cortante presente en la superficie de falla y el esfuerzo actuante. Duncan y Wright (2005) señalan que uno de los métodos para evaluar la estabilidad de un talud es el de dovelas, en donde el número de divisiones en dovelas en la superficie de falla depende de la geometría y el perfil del suelo, pudiendo ser la superficie de falla de forma circular o no circular. Uno de los métodos más empleados para realizar la evaluación de estabilidad de taludes es el propuesto por Spencer (1967) debido a que satisface simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos).

Como se mencionó en acápites anteriores, el flujo por licuación está asociado a grandes deformaciones y a consecuencias de falla extremas, como se muestra en la Figura 2.15; por lo que la evaluación de la estabilidad por equilibrio límite utilizando la resistencia licuada no drenada (S_{uLIQ}/σ'_{v0}) es requerida para estimar una posible liberación del material licuable en términos de un factor de seguridad.

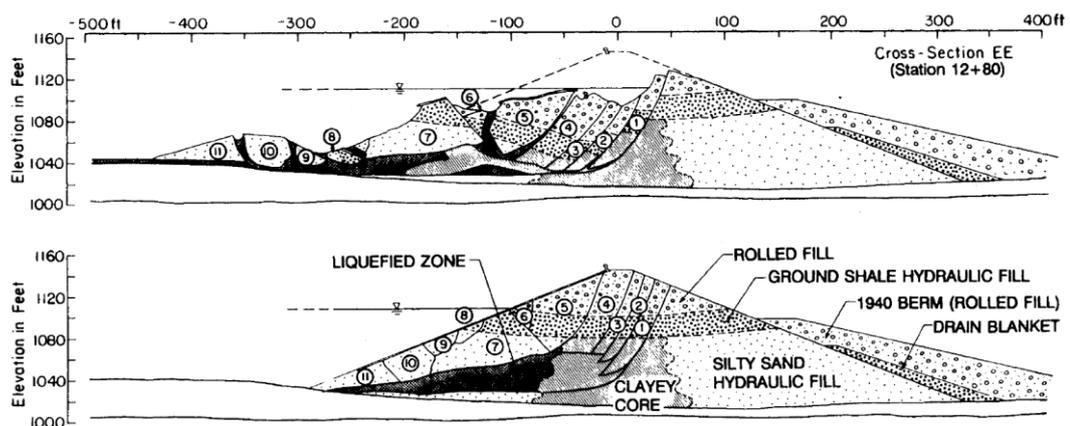


Figura 2.15 Sección transversal de una presa que ha fallado debido a la existencia de una zona que ha licuado. Además, se muestra la reconstrucción de la sección, a fin de esquematizar las deformaciones alcanzadas. **Fuente:** Olson (2001).

El análisis de estabilidad de taludes, según las condiciones planteadas en el presente estudio, consiste en evaluar su estabilidad proyectando las zonas potenciales de retención de solución en materiales del comportamiento del tipo *sand-like* y *clay-like*, que son propensos a licuar bajo la ocurrencia de un sismo, asignando a estos materiales una resistencia residual postlicuación.

Además, el análisis de estabilidad en condición postsismo, considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una fuerza vertical que corresponde al peso propio del mineral, que se contrapone a la resistencia no drenada postlicuación calculada a través de las metodologías propuestas por Olson (2002), Jefferies y Been (2016) y Robertson (2021) expuestas en el acápite 2.5.3, a fin de tomar en cuenta de manera aproximada y simplificada el efecto que resultaría en una falla por licuación si los factores de seguridad calculados se encontraran por debajo del mínimo permisible; sin embargo, el análisis no considera deformaciones resultantes luego de ocurrida la licuación, es decir, la geometría de la pila es la misma que la geometría de pre-falla o antes de la ocurrencia del evento sísmico. Por lo tanto, la evaluación de estabilidad de taludes postsismos es una herramienta de primer filtro; es decir, de conocer superficies de falla que no cumplen el factor de seguridad mínimo permisible, se deberá realizar análisis esfuerzo-deformación bajo condiciones dinámicas (evaluando la licuación cíclica con modelos constitutivos como UBCSand, PM4Sand, entre otros) o estáticas (evaluando la licuación estática con modelos constitutivos como el NorSand) a fin de obtener desplazamientos y excesos de presión de poros de forma acoplada que permita conocer el impacto de la potencial falla originada por licuación.

Duncan y Wright (2005) señalan que el factor de seguridad mínimo utilizado en un análisis de estabilidad debe ser proporcional a las incertidumbres involucradas en su cálculo y las consecuencias que se derivarían de una falla; mientras mayor sea el grado de incertidumbre sobre la resistencia al corte y otras condiciones, y mayores sean las consecuencias de la falla, mayor debe ser el factor de seguridad requerido. La presente tesis, toma en cuenta lo señalado anteriormente y dado que la caracterización geotécnica y la construcción de modelos geotécnicos se basan en uno de los ensayos más avanzados en la práctica ingenieril actual como lo es el SCPTu, adopta como factor mínimo de seguridad para una condición postsismo, lo recomendado por la *Canadian Dam Association - CDA* (2019), en su boletín *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*, el valor de 1,2.

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describirá los sondajes SCPTu realizados en una pila de lixiviación. Además, se presenta la caracterización geotécnica desarrollada a partir de los sondajes SCPTu a fin de poder construir los modelos geotécnicos representativos de la pila y que servirán de base para desarrollar los análisis de estabilidad postsismo.

3.2 ASPECTOS GEOTÉCNICOS DE LA PILA EN ESTUDIO

El estudio de una pila de lixiviación de mineral con problemas de percolación es dirigido para identificar qué características, físicas o de comportamiento, qué propiedades mecánicas e hidráulicas, qué régimen de flujo y qué extensión vertical y horizontal del mineral, que causa la retención de solución, se encuentran presentes en una sección típica de análisis de estabilidad con la premisa de que un mineral de este tipo es uno potencialmente licuable.

Una pila está diseñada para recuperar rápidamente el metal de interés y esto está ligado a la permeabilidad del mineral lixiviado y cómo esta disminuye progresivamente al tiempo que el volumen apilado aumenta en simultáneo a un riego constante de solución.

En las pilas de lixiviación, la distribución de la presión de poros no es hidrostática sino transitoria debido al riego de solución que se aplica de forma permanente durante un intervalo de tiempo a lo largo de una distribución caótica y espacialmente variable de materiales dominados por finos y de otros materiales intercalados aleatoriamente de diferentes características físicas en la que el mineral fino experimenta una reconsolidación debido a la ocurrencia simultánea de disipación de presión de poros y la aplicación progresiva de cargas debido al apilamiento progresivo de celdas de mineral.

Modelar aquella distribución caótica en función de las características físicas del mineral resulta impracticable y es necesario redirigir el enfoque del análisis sobre la base de la capacidad que tiene el mineral para inducir cargas de presión, o dicho de otro modo, de la dificultad con la que solución infiltra en la pila. Dicha capacidad depende de muchas variables y en esta investigación se ha adoptado como única variable a la permeabilidad como el parámetro que define qué capas

percolan solución con normalidad de aquellas que retienen solución a una razón mayor que la que equivale al flujo inducido por la tasa de riego aplicada. La permeabilidad ha sido relacionada a su vez a las características de comportamiento en términos de las mediciones con el ensayo SCPTu para mantener la consistencia en el enfoque. A las capas que retienen solución se les ha asignado el término de mineral dominado por finos.

El mineral dominado por finos puede ser susceptible tanto al flujo por licuación como a la licuación cíclica debido al solo hecho de saturar sus poros, así sea de manera transitoria; de hecho, el mineral clasificado por sus características de comportamiento como uno *clay-like* se le considera como uno que logra una saturación constante y se le asume un régimen de flujo permanente. Por lo tanto, dado que la saturación que se logre en un estado permanente es un requisito para desencadenar licuación, es clave estimar las extensiones horizontal y vertical del mineral dominado por finos y es lo primero que debe bosquejarse en el modelo de estabilidad a fin de identificar los mecanismos de falla más probables de una manera práctica.

3.2.1 Características físicas del mineral lixiviado

Dos de las características físicas que presenta el mineral lixiviado son el contenido de finos y la plasticidad. Debido a que estas características son relevantes en la operación de la pila, se debe definir si éstas reúnen las condiciones para que el mineral sea susceptible a licuar. Si bien el objetivo del presente estudio es caracterizar el mineral lixiviado según su comportamiento a partir de los resultados de los sondajes SCPTu, es importante dar una primera revisión a estas características físicas a fin de presentar como antecedente la evaluación de la susceptibilidad que tiene el mineral lixiviado a licuar.

En la Figura 3.1 se evaluó la susceptibilidad a la licuación del mineral lixiviado a través de la metodología propuesta por Armstrong y Malvick (2016).

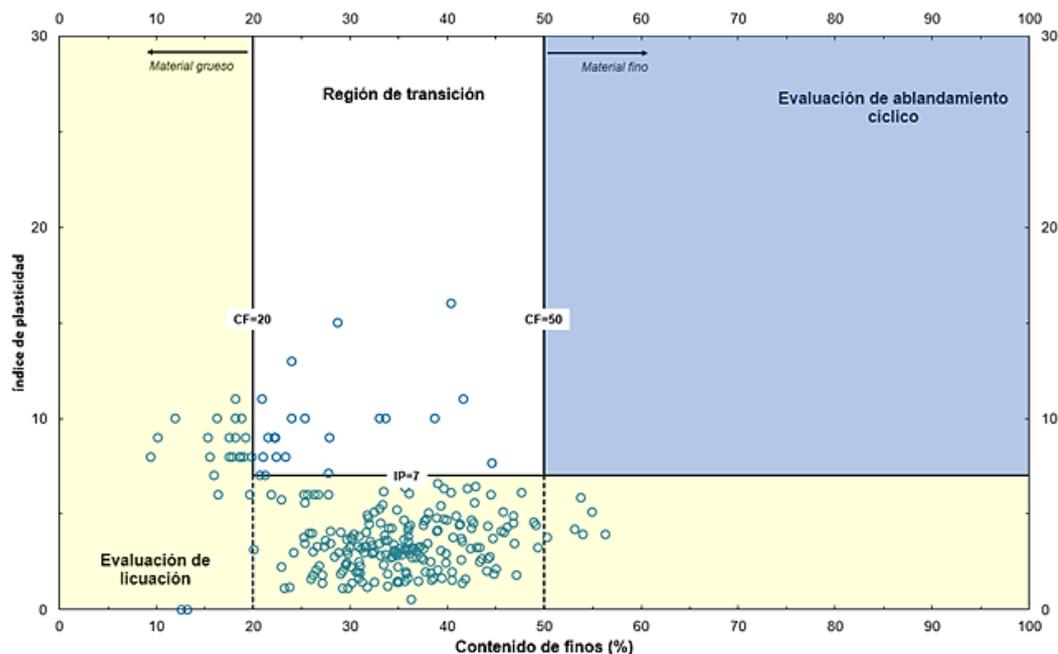


Figura 3.1 Susceptibilidad de licuación por Armstrong y Malvick (2016).

Los puntos azules representan muestras extraídas a profundidades entre 3 y 5 m y algunas a mayor profundidad donde se han realizado ensayos estándares de laboratorio como clasificación SUCS, gravedad específica, entre otros.

De la Figura 3.1 se observa que el mineral lixiviado, en su mayoría, presenta contenido de finos entre 20 y 50% considerándose como un material transicional, y, además, presenta una baja plasticidad por lo que en este material se deberá realizar una evaluación de licuación. De esta evaluación realizada, se observa que la pila de lixiviación requiere de una evaluación del potencial de licuación.

3.2.2 Régimen de flujo transitorio en la pila de lixiviación

El régimen de flujo en una pila de lixiviación es dinámico. Aunque existe una tendencia a mantener una tasa de riego constante, el hecho de que la presencia de los materiales dominados por finos estén intercalados de manera aleatoria con mineral grueso, deriva en un escenario en el que es complicado determinar una distribución permanente de las presiones de poro en equilibrio o un solo nivel freático o hidrostático dado que las pilas de lixiviación están realmente sujetas a cargas de presión de poros en estado transitorio que se distribuyen en curvas de nivel (ver Figura 3.2) y cambia entre fases sucesivas de la operación. Por lo tanto, si la evaluación se aborda en términos del grado de saturación, entonces se induce un escenario extremadamente conservador, ya que el mineral fino siempre estará

saturado, y es potencialmente licuable con base en la suposición de una respuesta no drenada del tipo *strain-softening*, que se adopta en el método simplificado, sin importar qué carga de presión de poros inicial se induzca en el mineral. En otras palabras, incluso si las presiones de poros fueran tan bajas como 1 kPa, las capas saturadas son susceptibles a licuar y podrían alcanzar una relación de exceso de presión de poros (r_u) ~ 1 .

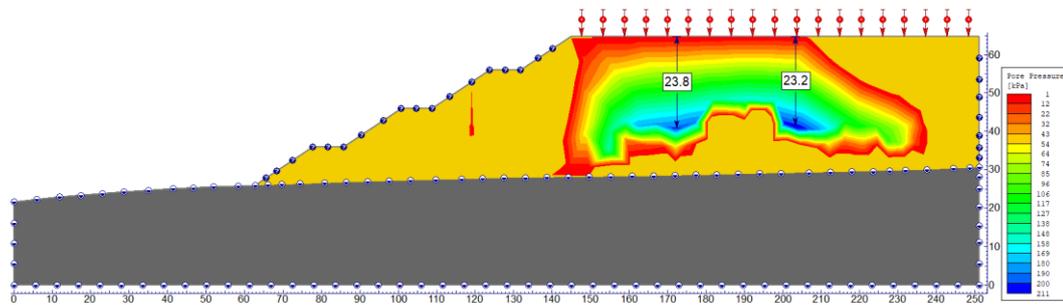


Figura 3.2 Distribución de cargas de presión estimada para un régimen transitorio debido a riego. **Fuente:** Elaboración propia.

3.2.3 Permeabilidad en mineral lixiviado

En las pilas de lixiviación, la degradación del mineral inducida por la solución genera un aumento del contenido de finos y, por lo tanto, induce una disminución en la permeabilidad global del mineral junto a una transición espontánea de condiciones drenadas a no drenadas en su comportamiento mecánico e hidráulico.

En general, el diseño de lixiviación en pilas requiere que el mineral presente una conductividad hidráulica mínima (cm/s) equivalente (K_{SATmin}) a un orden de magnitud mayor que la tasa de riego aplicada ($L/h/m^2$), como se muestra en la Tabla 3.1, es decir, 10 veces mayor. La adopción del K_{SAT} equivalente es un criterio práctico para el desempeño hidráulico del mineral antes del apilamiento, que corresponde a un valor de $2,78 \times 10^{-4}$ cm/s asociado a una tasa de riego de $10 L/h/m^2$.

La Tabla 3.1 resume los valores mínimos de conductividad hidráulica que debe presentar el mineral de acuerdo con las tasas de riego típicas de lixiviación en pilas.

Tabla 3.1
Tasas de riego y conductividad hidráulica equivalente recomendadas para el control del desempeño del mineral

Tasa de riego (L/h/m ²)	K _{SAT} Equivalente (cm/s)	K _{SAT} Diseño estándar (cm/s)	K _{SAT} Diseño conservador (cm/s)
5	1,39x10 ⁻⁴	1,39x10 ⁻³	1,39x10 ⁻²
6	1,67x10 ⁻⁴	1,67x10 ⁻³	1,67x10 ⁻²
7	1,94x10 ⁻⁴	1,94x10 ⁻³	1,94x10 ⁻²
8	2,22x10 ⁻⁴	2,22x10 ⁻³	2,22x10 ⁻²
9	2,50x10 ⁻⁴	2,50x10 ⁻³	2,50x10 ⁻²
10	2,78x10 ⁻⁴	2,78x10 ⁻³	2,78x10 ⁻²

Abreviaturas:

K_{SAT}: Conductividad hidráulica saturada en cm/s.

Por otro lado, generalmente se emplea una tasa de riego de 10 L/h/m², lo que implica la adopción de una K_{SAT} mínima de 2,78x10⁻³ cm/s como límite para todo el rango de nivel de esfuerzos que depende del número de capas, y cumplir con dicho límite como se muestra en la Figura 3.3.

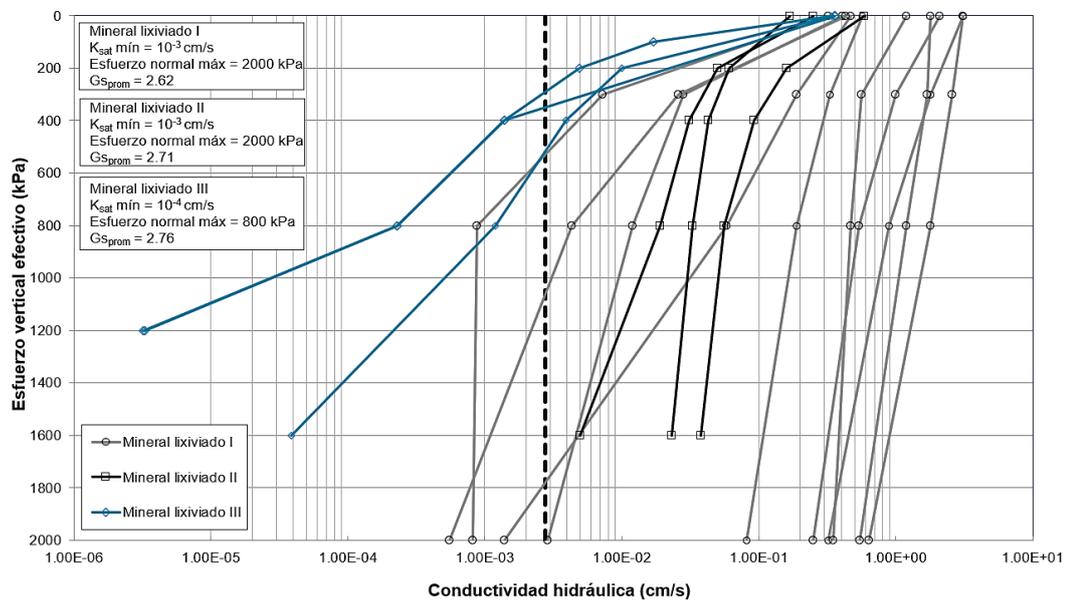


Figura 3.3 Relación entre la conductividad hidráulica y el esfuerzo vertical efectivo en mineral lixiviado.

En la Figura 3.3 se observa que la K_{SAT} es inversamente proporcional al esfuerzo vertical efectivo (σ'_{v0}) para diferentes tipos de mineral lixiviado de diferentes características físicas. Para evaluar este aspecto geotécnico se requiere de

muchos ensayos para establecer un perfil patrón de permeabilidad del mineral, por lo que se aprovechan las ventajas de los ensayos SCPTu para caracterizarlo de forma continua en todo el perfil auscultado.

3.3 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS EN LA PILA DE LIXIVIACIÓN

Se ha recopilado 09 sondajes SCPTu realizados en una pila de lixiviación ubicada en una región al norte de Chile durante setiembre y octubre de 2021. Estos sondajes fueron ejecutados tanto en la cresta como en bancos intermedios de una zona crítica de la pila estudiada, dado que ésta requería de una evaluación geotécnica a fin de estimar su desempeño ante un evento sísmico.

Dichos sondajes fueron ejecutados hasta una profundidad que dista entre 2 m a 5 m de la superficie de revestimiento de la pila, a fin de prevenir daños en la geomembrana. Se debe precisar que, dadas las características físicas del mineral lixiviado, se pudo hincar el piezocono hasta la profundidad objetivo, siendo este un primer indicio de la degradación del mineral y la existencia de material dominado por finos. La Figura 3.4 presenta la ubicación de los sondajes SCPTu estudiados.

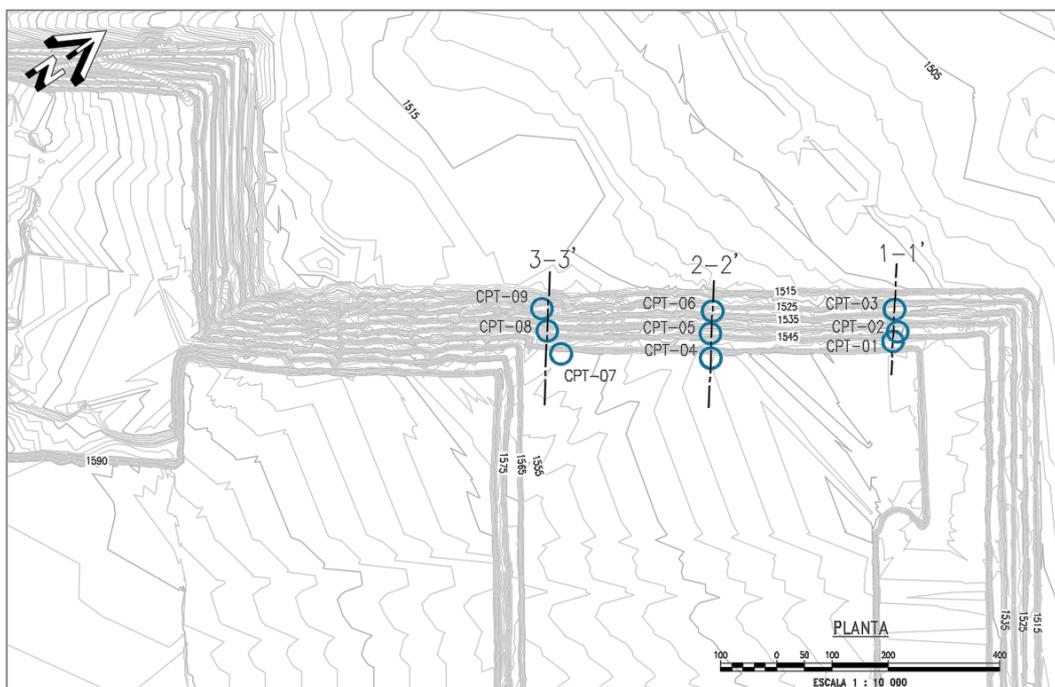


Figura 3.4 Ubicación de los sondajes SCPTu ejecutados en la pila de lixiviación.

La Tabla 3.2 resume las características de los sondajes SCPTu que fueron empleados en la presente investigación. En el Anexo A se presenta los perfiles de registros obtenidos en los sondajes SCPTu y su procesamiento.

Tabla 3.2
Resumen de ensayos SCPTu empleados

Sección	Sondaje	Fecha	Prof. (m)	q_c (MPa)	f_s (kPa)	u_2 (kPa)
1-1'	SCPTu-01	12-10-21	33,0	[1,5 - 18,5]	[15,7 - 526,6]	[-15,3 - 85,6]
	SCPTu-02	25-10-21	27,0	[1,4 - 40,0]	[4,6 - 1045,8]	[-18,8 - 205,7]
	SCPTu-03	13-10-21	13,0	[0,6 - 24,6]	[0,4 - 262,1]	[0,6 - 16,8]
2-2'	SCPTu-04	06-10-21	38,0	[0,8 - 29,9]	[3,3 - 987,6]	[-26,3 - 88,2]
	SCPTu-05	26-10-21	27,0	[0,9 - 18,1]	[6,2 - 555,3]	[-35,9 - 242,7]
	SCPTu-06	13-10-21	12,0	[0,4 - 11,4]	[0,7 - 224,8]	[-16,3 - 38,7]
3-3'	SCPTu-07	05-10-21	39,0	[0,3 - 28,1]	[0,1 - 612,3]	[-28,7 - 81,0]
	SCPTu-08	28-10-21	27,0	[0,5 - 16,1]	[1,4 - 380,5]	[-23,1 - 48,3]
	SCPTu-09	14-10-21	13,0	[0,2 - 23,5]	[1,4 - 302,4]	[-0,8 - 32,7]

Abreviaturas:

Prof.: profundidad

q_c : resistencia por punta

f_s : resistencia por fuste

u_2 : carga de presión de poros dinámica

Por otro lado, la Tabla 3.3 resume las mediciones geofísicas y la presión en equilibrio estimada de los ensayos de disipación de presión de poros (PPD, por sus siglas en inglés) en cada sondaje realizado.

Tabla 3.3
Ensayos geofísicos y PPD en los SCPTu recopilados

Sección	Sondaje	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Ensayos de disipación (PPD)			
				Cant.	Prof. (m)	t (s)	u_0 (kPa)
1-1'	SCPTu-01	[292 - 529]	[651 - 870]	3	15,83	710	29
					21,83	1110	39
					25,83	4920	41
	SCPTu-02	[239 - 580]	[496 - 1478]	5	10,45	2250	45
					23,53	1220	17
					24,30	730	400
				25,28	2640	54	
				26,38	265	230	
	SCPTu-03	[272 - 615]	[415 - 1063]		Sin ensayos PPD		
2-2'	SCPTu-04	[179 - 513]	[258 - 939]	4	8,13	1040	5
					14,55	1530	29
					18,63	1060	29

Sección	Sondaje	V_S (m/s)	V_P (m/s)	Ensayos de disipación (PPD)			
				Cant.	Prof. (m)	t (s)	u_0 (kPa)
3-3'	SCPTu-05	[174 - 527]	[329 - 1090]	4	27,75	3060	27
					3,35	6300	57
					5,98	9840	21
					7,70	2040	26
	SCPTu-06	[223 - 429]	[382 - 911]	1	14,63	1160	54
					9,90	980	37
	SCPTu-07	[253 - 575]	[457 - 1124]	3	8,65	595	140
					11,35	1090	60
					30,25	1980	69
SCPTu-08	[208 - 519]	[561 - 892]		Sin ensayos PPD			
SCPTu-09	[379 - 439]	[609 - 639]		Sin ensayos PPD			

Abreviaturas: V_S : velocidad de ondas de corte V_P : velocidad de ondas compresionales

Cant.: Cantidad

Prof.: profundidad

 u_0 : carga de presión de poros en equilibrio

t: tiempo

Nota:

1. Algunos ensayos PPD no lograron desarrollarse por mostrar cargas de presión en el rango negativo, por lo que no han sido incluidos en la Tabla 3.2.

La variación de las cargas de presión de poros dinámicas (u_2) mostradas en la Tabla 3.2 (ver perfiles u_2 de cada SCPTu en el Anexo A) muestran el comportamiento hidráulico de la pila evaluada, confirmando un régimen de flujo transitorio originado por la aplicación del riego de solución en la superficie o cresta de la pila. Por otro lado, la Tabla 3.3 muestra la existencia de $u_0 > 0$ kPa, siendo esto una evidencia de la presencia de mineral dominado por finos que retiene solución originando una carga de presión de poros, *i.e.* existe mineral que podría estar saturado y en condiciones no drenadas.

3.4 MODELOS GEOTÉCNICOS

3.4.1 Construcción de modelos geotécnicos

Los modelos geotécnicos fueron construidos a partir de la diferenciación de materiales que pueden comportarse como una arena densa, arena suelta de baja permeabilidad (que retendrá solución aumentado el grado de saturación) o una arcilla. Lo mencionado anteriormente será posible identificando el comportamiento del suelo según los registros de los sondajes SCPTu, donde se utilizará la clasificación propuesta por Robertson (2016) para diferenciar los diferentes tipos de suelos a través del índice modificado de comportamiento de suelo, I_B ,

representados por fronteras hiperbólicas presentadas en la Figura 2.2. El I_B se obtiene a través de la siguiente formulación:

$$I_B = \frac{100(Q_{tn} + 10)}{(Q_{tn}F_r + 70)}$$

El criterio a partir del I_B será tomado como base para definir las capas dominadas por finos que serán conformadas por suelos tipo *clay-like* ($I_B < 22$) y transicionales ($22 < I_B < 32$), y además, de los suelos del tipo *sand-like* ($I_B > 32$) que presenten baja permeabilidad, que según la ubicación de los sondajes SCPTu, se establecerá la extensión y profundidad de dichas capas.

Además, se evaluará la frontera contractiva-dilatante (CD) igual a 70 para separar a los materiales susceptibles a presentar flujo por licuación. La siguiente relación representa dicha frontera:

$$CD = (Q_{tn} - 11)(1 + 0,06F_r)^{17}$$

Por otro lado, se utilizó otro criterio para la identificación de mineral del tipo *sand-like* de baja permeabilidad a partir del índice normalizado de comportamiento de suelo, I_c , (*Normalized Soil Behavior Type Index* en inglés) y la correlación entre la permeabilidad saturada (K_{sat}) y el I_c bajo la formulación propuesta por Robertson (2010a) como sigue:

$$K_{sat} = 10^{(0,952 - 0,341I_c)} \quad \text{para } 1,0 < I_c \leq 3,27$$
$$K_{sat} = 10^{(-4,52 - 1,37I_c)} \quad \text{para } 3,27 < I_c < 4,0$$

Que según lo definido en la Tabla 3.1, se asume como una permeabilidad mínima permitida de diseño el valor de $1,39 \times 10^{-3}$ cm/s que corresponde a un valor 05 veces mayor (medio orden de magnitud) que el K_{SAT} teórico ($2,78 \times 10^{-4}$ cm/s) para una tasa de riego de 10 L/h/m² (ver Tabla 4.1) y que a su vez se relaciona con un I_c igual a 1,91.

A continuación, en las Figuras 3.5 a la 3.7 se muestra el perfil I_B y la gráfica Q_{tn} - $F_r(\%)$ para cada sondaje SCPTu evaluado por cada sección de análisis mostradas en la Figura 3.4.

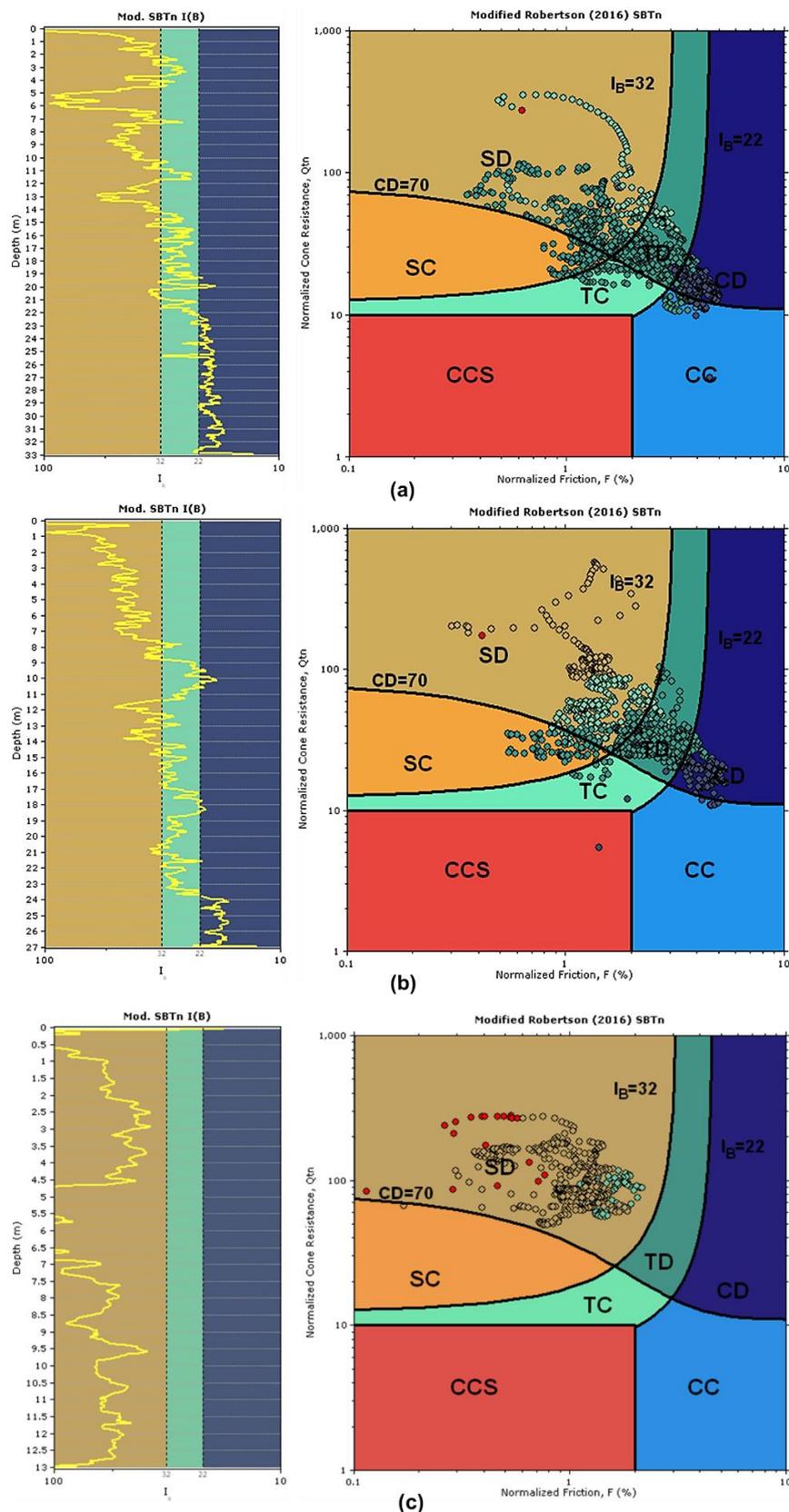


Figura 3.5 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica Q_{tn} - F_r (%) del sondaje **(a)** SCPTu-01_Sección 1-1' **(b)** SCPTu-02_Sección 1-1' **(c)** SCPTu-03_Sección 1-1'.

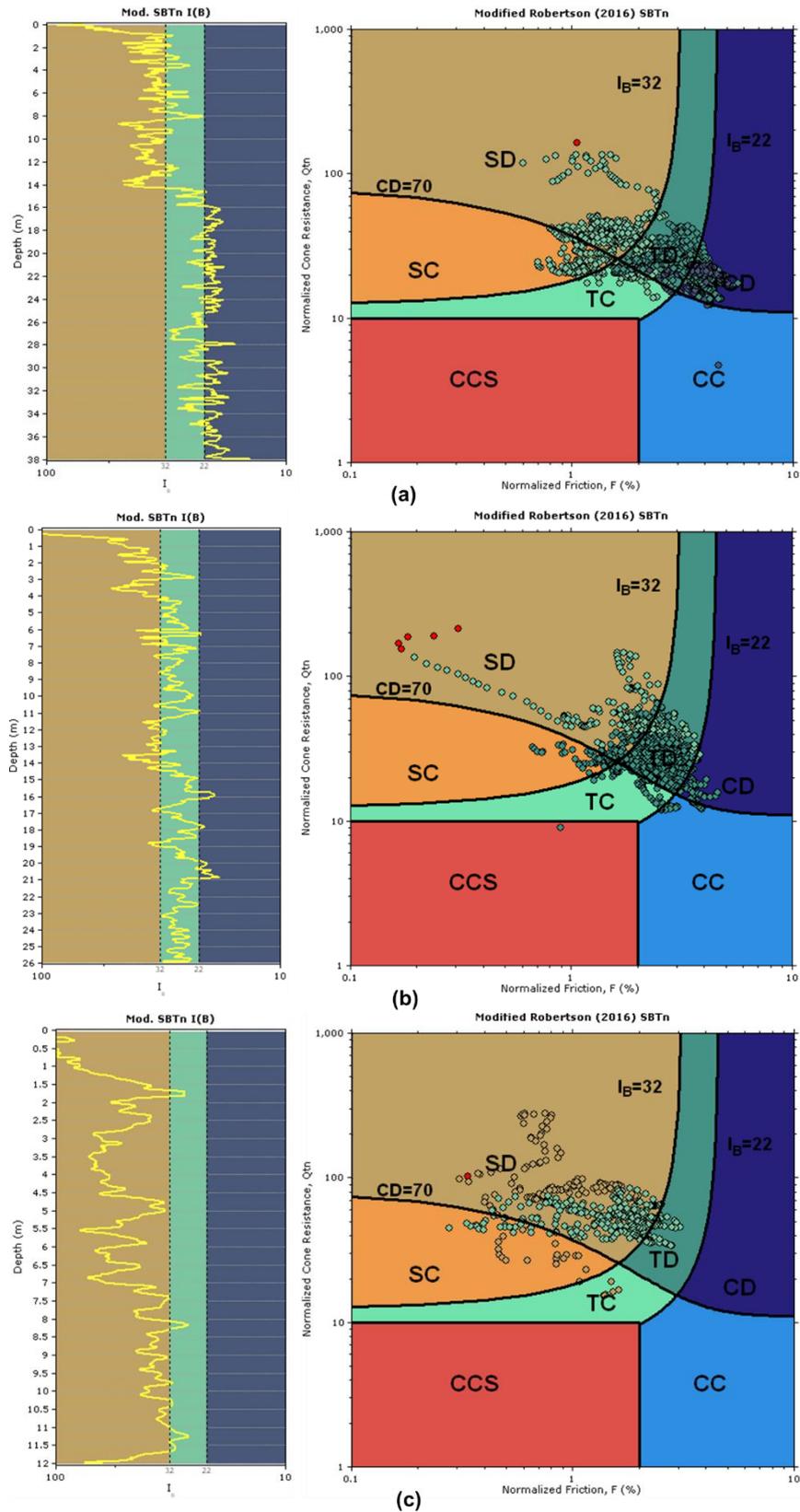


Figura 3.6 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica Q_{tn} - F_r (%) del sondaje (a) SCPTu-04_Seccción 2-2' (b) SCPTu-05_Seccción 2-2' (c) SCPTu-06_Seccción 2-2'.

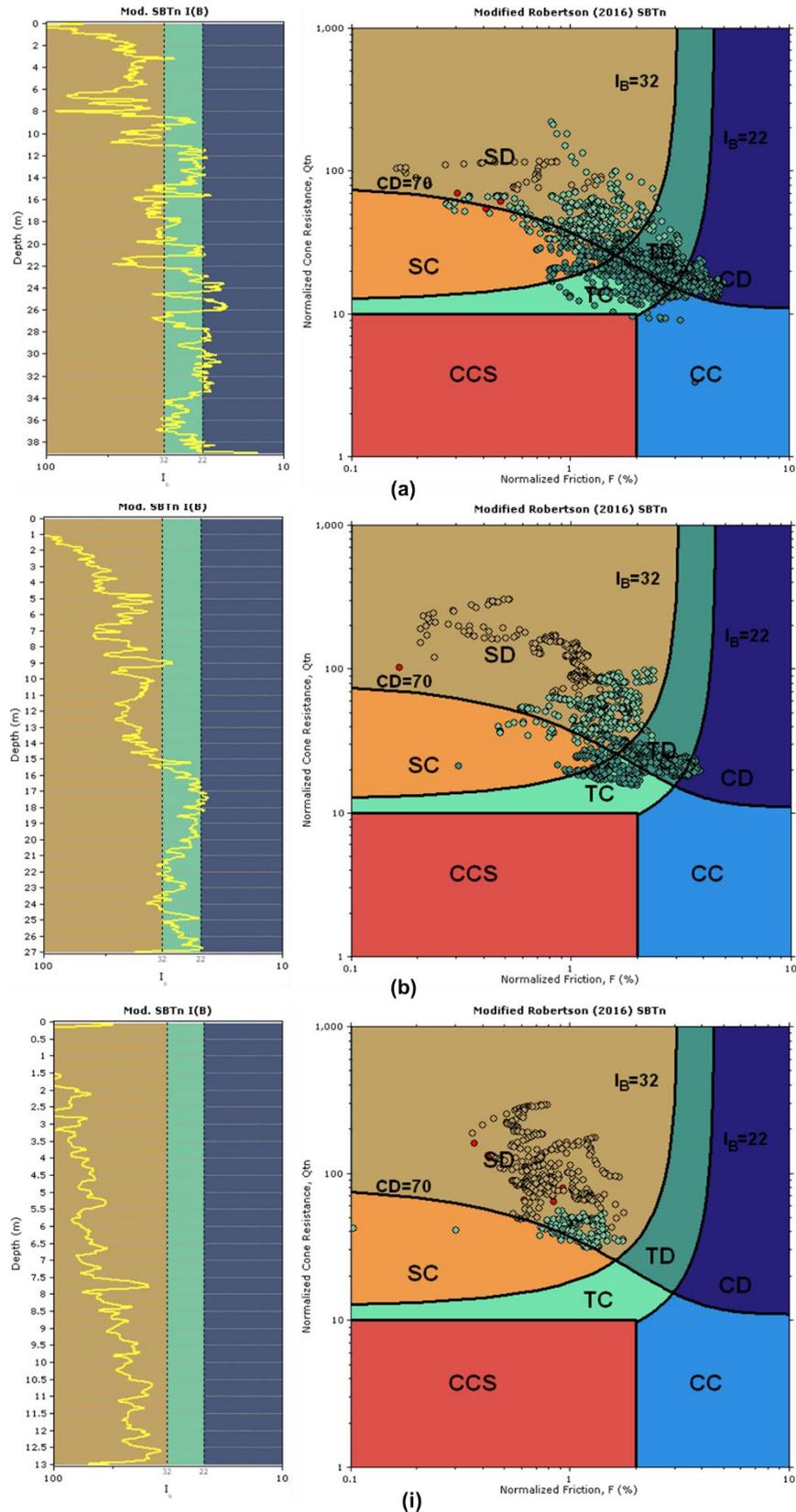


Figura 3.7 Perfiles del índice modificado de comportamiento de suelo (I_B), frontera contractivo-dilatante (CD) y gráfica Q_{tn} - F_r (%) del sondaje **(a)** SCPTu-07_Sección 3-3' **(b)** SCPTu-08_Sección 3-3' **(c)** SCPTu-09_Sección 3-3'.

Además, en las Figuras 3.8 a la 3.10 se muestran los perfiles de la clasificación del suelo por su comportamiento propuesto por Robertson (2016). Estos perfiles se tomarán como base para construir los modelos geotécnicos de cada sección de análisis que conformarán la evaluación de la estabilidad de taludes de la pila. Debe notarse que la extensión vertical de las capas dominadas por finos podrá ser estimada con alta precisión, por lo que deberá ponerse atención a las suposiciones para estimar la extensión horizontal de aquellas capas.

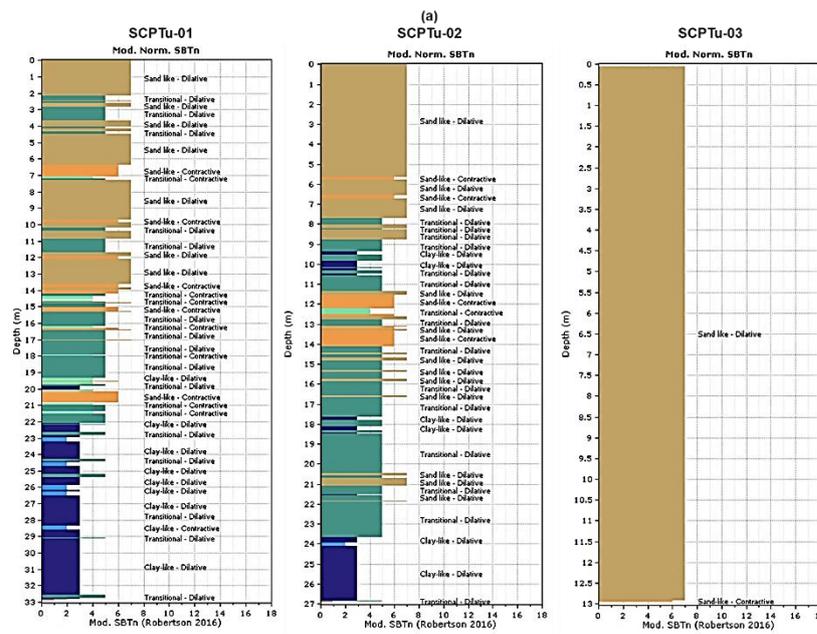


Figura 3.8 Perfiles I_c modificado en la sección 1-1’.

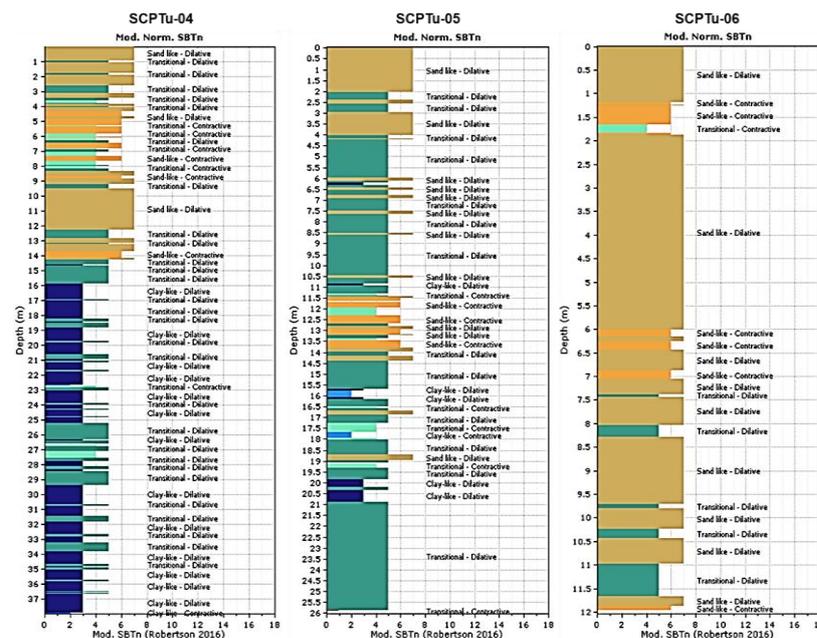


Figura 3.9 Perfiles I_c modificado en la sección 2-2’.

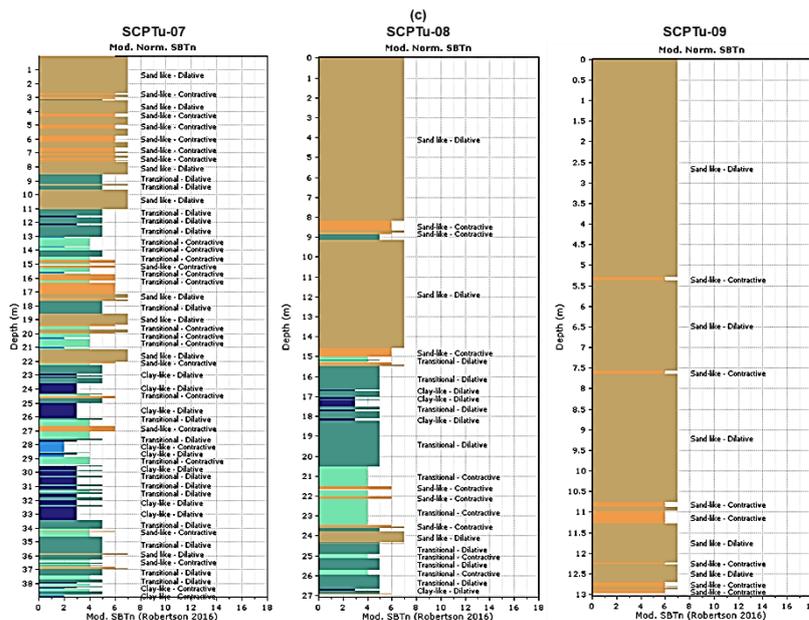


Figura 3.10 Perfiles I_c modificado en la sección 3-3’.

La Tabla 3.4 resume los criterios adoptados para clasificar, identificar y estimar la extensión de las capas de mineral por el tipo de su comportamiento.

Tabla 3.4
Clasificación del mineral lixiviado basada en I_B , I_c y CD

Comportamiento	I_B	I_c (ver nota 1)	CD	Condición de análisis	Parámetro por asignar
Sand-like drenado dilatante	>32	$\leq 1,91$	>70	Estática	ϕ
Sand-like no drenado contractivo	>32	$I_c < 1,91-2,6 >$	<70	Post-sismo	S_{uLIQ}/σ'_{v0}
Clay-like dilatante	$22 < I_B < 32$ < 22	$> 2,6$	> 70	Estática y post-sismo	$S_{u(remolded)}/\sigma'_{v0}$, $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$
Clay-like contractivo	$22 < I_B < 32$ < 22	$> 2,6$	< 70	Estática y post-sismo	$S_{u(remolded)}/\sigma'_{v0}$, S_{uLIQ}/σ'_{v0}

Símbolos y abreviaturas:

I_B : índice modificado de comportamiento de suelo
 I_c : índice normalizado de comportamiento de suelo
 CD: número de la frontera contractivo-dilatante
 ϕ : ángulo de fricción interna
 S_{uLIQ}/σ'_{v0} : relación de resistencia no drenada licuada
 $S_{u(remolded)}/\sigma'_{v0}$: relación de resistencia no drenada remoldeada

Nota:

1. El mineral lixiviado con $I_c > 1,91$ estará vinculado principalmente a la evaluación del potencial de licuación.

La pila de lixiviación a evaluar, antes de contar con los sondeos SCPTu ejecutados hasta noviembre de 2021, presentaba un grado de incertidumbre asociado a la extensión del mineral dominado por finos (*clay-like* o *sand-like* no

drenado) y a la indefinición del contenido de finos *threshold* que controla la permeabilidad mínima admisible que permite recuperar la solución de lixiviación sin dificultad. Para tomar acción con respecto a esto último, se propone vincular las características de comportamiento con la K_{SAT} a fin de empezar a zonificar todas aquellas capas que presentarán una K_{SAT} menor que la mínima sin requerir de extensos programas de laboratorio para la identificación de las características físicas que definen al mineral dominados por finos.

Los sondajes SCPTu han permitido tener un mayor grado de certeza en la extensión vertical del mineral dominado por finos ($I_B < 22$) basándose en las características del comportamiento (*behavioral characteristics*) en reemplazo de las características físicas, *i.e.* granulometría, contenido de finos, índice de plasticidad, G_s , entre otras. Las ventajas de clasificar al mineral en función de sus características de comportamiento (Robertson, 2016) es que permiten estimar aproximadamente qué zonas se encuentran en estado contractivo o dilatante y qué mixtura de suelo formado dentro de la pila se comportará como una arena de baja permeabilidad en estado contractivo (*sand-like*) o como una arcilla (*clay-like*), de forma independiente a sus características físicas.

Por otro lado, la definición de la extensión horizontal de las capas dominadas por finos mejora con los sondajes intermedios entre los SCPTu realizados entre la cresta de la pila y bancos inferiores, obteniéndose información que mejora la proyección sobre las secciones de análisis.

Se menciona a continuación las suposiciones en la construcción de los modelos geotécnicos basados en los sondajes SCPTu:

- En la pila evaluada se proyectaron 03 sondajes SCPTu en las secciones de análisis. Estos sondajes se encuentran ubicados tanto en la cresta como en el talud de la pila.
- Los modelos geotécnicos de las secciones de análisis para la evaluación de la estabilidad de taludes fueron enfocados en las zonas de mayor riesgo de deslizamiento, asimismo, el sondaje SCPTu ejecutado en la cresta es el que delimita la extensión del modelo.
- Se considera 1 m como el espesor mínimo de una capa.
- Para la construcción de los modelos geotécnicos se identificaron:

- Todas las capas del mineral dominado por finos (*clay-like*, $I_B < 22$) que retendrían solución.
- Las capas transicionales ($22 < I_B < 32$) cercanas a capas *clay-like* que se considerarán, de forma conservadora, como una capa dominada por finos.
- Capas contractivas ($CD < 70$) que, según lo presentado por Robertson (2016) y Robertson (2021), pueden presentar flujo por licuación y que pueden ser del tipo *clay-like* o *sand-like*.
- La extensión vertical del mineral dominado por finos se definió con base en los espesores identificados en los perfiles de los ensayos SCPTu (ver Figura 3.11).
- La extensión horizontal de las capas de mineral dominado por finos se definió con base en las siguientes suposiciones:
 - La extensión horizontal de estas capas fue asumida de acuerdo con las iteraciones realizadas previas a los análisis para encontrar la superficie de falla de mayor extensión y de menor factor de seguridad.
 - Toda extensión horizontal presenta una dirección paralela a la cresta de cada piso de la pila considerando que el apilamiento es uno progresivo y que se realiza por capas secuenciales.
 - Las capas dominadas por finos identificadas en los sondajes se conectan siguiendo aproximadamente una proyección biunívoca.
 - Se ha evidenciado a través de inspecciones y ensayos de campo y laboratorio que el mineral en los taludes de algunos de los bancos presentaría un comportamiento dilatante debido a su densidad *in situ*. Además, no se ha evidenciado indicios de retención de solución, por lo que se evitará que la extensión horizontal de las zonas dominadas por finos llegue hasta los taludes, evitando así un escenario extremadamente conservador.

La Figura 3.11 muestra los modelos geotécnicos construidos a partir de los sondajes SCPTu, donde las zonas azules corresponden a los materiales tipo *clay-like* ($I_B > 32$) mientras que las amarillas son los materiales *sand-like* y *clay-like*

contractivos ($CD < 70$). En el Capítulo IV se realizará la evaluación del potencial de licuación para identificar las capas susceptibles a licuar.

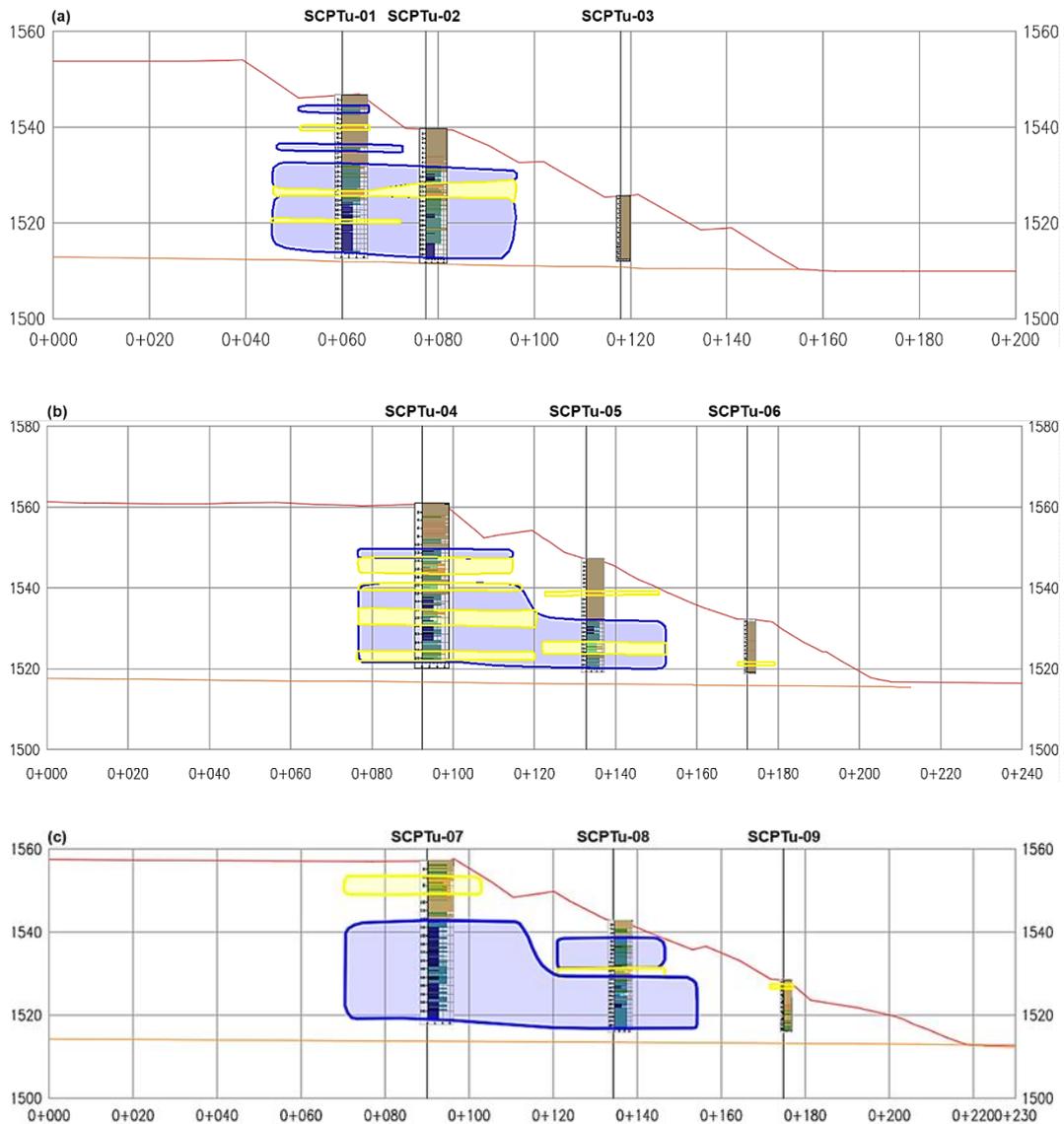


Figura 3.11 Modelos geotécnicos construidos a partir de los sondajes SCPTu en las secciones **(a)** 1-1' **(b)** 2-2' **(c)** 3-3'.

Por otro lado, la Tabla 3.5 describe las secciones de análisis (zonas dominadas por finos y contractivas) a partir de los sondajes SCPTu utilizados para la construcción de los modelos geotécnicos.

Tabla 3.5
Descripción de las secciones de análisis

Sección	Sondaje	Zonas (m)		Descripción
		Dominadas por finos (ver nota 1)	Contractivas (ver nota 2)	
1-1'	SCPTu-01	2,0-4,0		En el SCPTu-01 hasta los 14,0 m predomina mineral lixiviado tipo <i>sand-like</i> , mientras que desde los 14 m hasta los 23,0 m predomina el transicional y, el último tramo, hasta los 33,0 m predomina el <i>clay-like</i> .
		10,0-12,0	6,5-7,5	
		14,0-20,0	20,0-21,0	
		21,0-26,0	26,0-27,0	
		27,0-33,0		
	SCPTu-02	8,0-11,5	11,5-14,5	En el SCPTu-02 entre 0,0-8,0 m y 11,5-14,5 m predomina mineral lixiviado tipo <i>sand-like</i> , mientras que entre 8,0-11,5 m y 14,5-24,0 m predomina el transicional y, por último, hasta los 27,0 m predomina el <i>clay-like</i> .
	SCPTu-03	No presenta	No presenta	El SCPTu-03 presenta material <i>sand-like</i> dilatante en toda su profundidad.
2-2'	SCPTu-04	11,0-13,0	13,0-17,0	En el SCPTu-04 hasta los 11,0 m predomina mineral lixiviado del tipo <i>sand-like</i> . Por otro lado, entre 11,0-24,0 m se observa una mezcla de mineral <i>sand-like</i> y transicional mientras que entre 24,0-34,0 m se observa una mezcla de mineral <i>clay-like</i> y transicional y, por último, hasta los 38,0 m predomina el transicional.
		21,5-26,0	19,5-21,5	
		30,0-36,0	26,0-30,0	
			36,0-38,0	
	SCPTu-05	15,0-20,5	8,0-9,0	En el SCPTu-05 hasta los 15,0 m predomina mineral lixiviado del tipo <i>sand-like</i> y hasta los 27,0 m predomina del tipo transicional.
		23,5-27,0	20,5-23,5	
	SCPTu-06	No presenta	10,5-11,5	El SCPTu-06 presenta material <i>sand-like</i> en toda su profundidad.
3-3'	SCPTu-07	14,0-39,0	4,0-8,0	En el SCPTu-07 hasta los 14,0 m predomina mineral lixiviado del tipo <i>sand-like</i> y hasta los 39,0 m predomina del tipo <i>clay-like</i> . En toda la profundidad auscultada se presenta capas de poca profundidad de mineral transicional.
	SCPTu-08	4,0-11,5	11,5-13,5	En el SCPTu-08 entre 0,0-4,0 m y 11,5-13,5 m predomina el mineral lixiviado del tipo <i>sand-like</i> mientras que entre 4,0-11,0 m y 13,5-27,0 m predomina el transicional. Entre 13,5-27,0 m existen capas de poca profundidad de mineral lixiviado del tipo <i>clay-like</i> .
		13,5-27,0		

Sección	Sondaje	Zonas (m)		Descripción
		Dominadas por finos (ver nota 1)	Contractivas (ver nota 2)	
	SCPTu-09	9,5-11,5	1,0-2,0	En el SCPTu-09 predomina mineral lixiviado del tipo <i>sand-like</i> en toda la profundidad del sondaje. Entre 8,0-12,0 m existen capas de poca profundidad de mineral lixiviado del tipo transicional.

Símbolos y abreviaturas: I_B : índice modificado de comportamiento de suelo

CD: frontera de materiales contractivos-dilatantes

Notas:

1. Las zonas dominadas por finos corresponden al mineral lixiviado con $I_B < 22$ y $22 < I_B < 32$. El mineral con $I_B > 32$ y $CD > 70$ corresponde al *sand-like* dilatante drenado que corresponderá al más resistente en la pila por estar más denso y que presentará un comportamiento del tipo *strain-hardening* o de endurecimiento.
2. Las zonas contractivas comprenden al mineral lixiviado con $CD < 70$ susceptibles a flujo por licuación y que puede ser clasificado como *sand-like*, *clay-like* o transicional. En el capítulo IV se evaluará el potencial de licuación donde se incluirá la clasificación según el I_c .

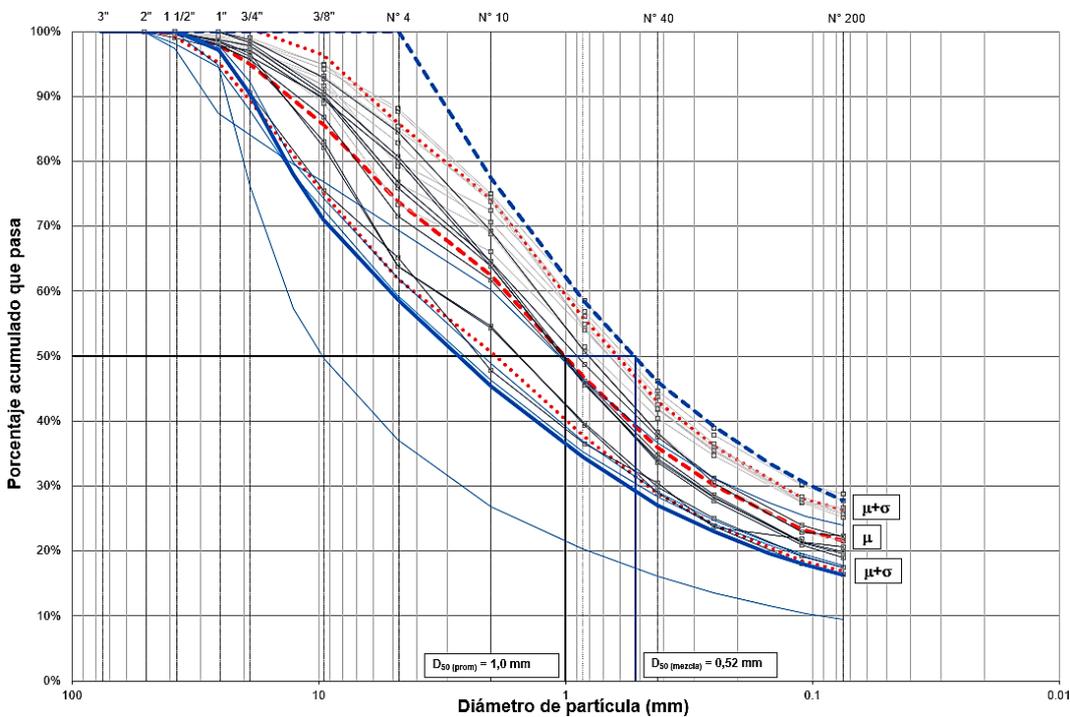
3.5 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL MINERAL LIXIVIADO

3.5.1 Características físicas

En la Figura 3.12 se observa en gris las 18 curvas granulométricas de las muestras extraídas de forma superficial mediante la ejecución de 02 calicatas. Adicional a ellas se reportan cinco (05) registros de muestras extraídas de 03 sondajes sísmicos a una profundidad que varía de 19,9 m a 41,0 m (muestras a profundidad) y que clasifican, según SUCS, como arenas arcillosas con gravas (SC) con un contenido de finos que varía de 16% a 24% y que se muestran en la Figura 3.8 de color azul donde la curva granulométrica azul de mayor grosor corresponde a la muestra con la que se ha realizado ensayos especiales mientras que la punteada en azul es aquella cortada por el tamiz de TM N° 4. Estos registros complementaron la banda granulométrica con la excepción del material clasificado como GP-GC en una muestra a una profundidad aproximada de 48,25 m ya que se encuentra muy alejada de la tendencia de la banda, y presenta un contenido de gravas del 63% por lo que puede tratarse de un caso aislado. Para representar la curva granulométrica del mineral lixiviado se adoptó una banda cuyos límites fueron construidos considerando la desviación estándar (σ) de los datos tomando como patrón el promedio de estos en cada malla. Los límites superior e inferior y la curva granulométrica promedio se muestran en color rojo en la Figura 3.12.

De la revisión de estos datos se obtiene que el mineral presenta un D_{50} de 1,0 mm, un contenido de finos promedio de la banda (en rojo) de 22 % con una $\sigma = 5$ %,

un contenido de gravas que varía de 11,8 % hasta 62,9 %, un contenido de arenas que varía de 27,7 % hasta 62,2 % y un contenido de finos que varía de 9,4 % hasta 28,8 %.



Símbolos y abreviaturas:

μ : promedio σ : desviación estándar
 D_{50} : diámetro promedio del 50% de porcentaje acumulado que pasa en el mineral

Notas:

1. Se compilaron un total de nueve (09) registros de ensayos de granulometría por tamizado en cada calicata.
2. En la mezcla, que corresponde a la curva azul de mayor grosor, se observa la curva granulométrica del material donde se realizaron los ensayos especiales.
3. En los ensayos especiales, el material fue cortado a un TM N°4 y presenta un diámetro $D_{50} = 0,52$ mm.

Figura 3.12 Curvas granulométricas del mineral lixiviado construidas a partir de la compilación de registros.

La Figura 3.13 muestra la carta de plasticidad con 23 registros compilados (18 en gris correspondientes a calicatas y 05 en azul, a los sondajes sísmicos). El grupo de las muestras de las calicatas y sondajes sísmicos presenta valores del límite líquido (LL) entre 15 y 27 y del índice de plasticidad (IP) entre 3 y 13 notándose también una diferencia entre el LL del grupo de muestras de calicatas y sondajes sísmicos siendo este un posible antecedente de la degradación del mineral a profundidad, además indican que es un suelo de plasticidad y compresibilidad media que es susceptible a retener solución.

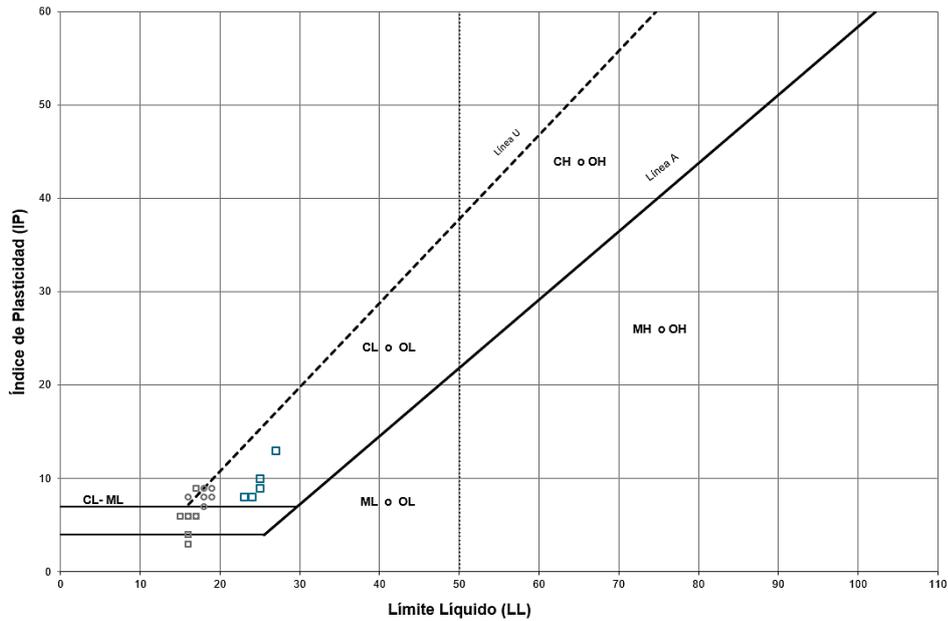


Figura 3.13 Límites de Atterberg del mineral lixiviado construido a partir de la compilación de registros.

La Figura 3.14 muestra el registro histórico de valores de gravedad específica con un valor promedio estable de 2,81; $\mu - \sigma = 2,74$; $\mu + \sigma = 2,88$. El grupo de las muestras a profundidad (ver puntos azules) presenta un sesgo cercano a 2,74.

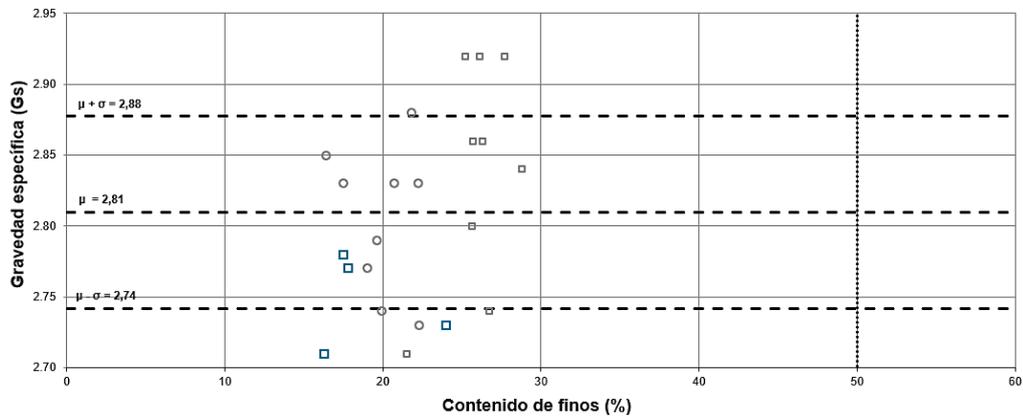


Figura 3.14 Contenido de finos versus gravedad específica del mineral lixiviado construido a partir de la compilación de registros.

Los ensayos de laboratorio de propiedades físicas mostrados anteriormente confirman la presencia de mineral lixiviado que se encuentra dominado por finos que nos permite inferir que este material podría retener solución generando condiciones no drenadas. La desventaja de este tipo de investigaciones es que son puntuales, por lo que en esta investigación se les hace referencia como antecedentes y poder establecer un vínculo coherente con el criterio definido por

las características de comportamiento del suelo para poder aplicar los sondajes SCPTu y así caracterizar los modelos geotécnicos elaborados.

3.5.2 Ensayos triaxiales y curva de estado crítico

Se recopiló ensayos triaxiales de compresión isotrópica del tipo consolidado-no drenado (CU) y consolidado-drenado (CD). Los ensayos triaxiales fueron realizados a fin de estimar una línea de estado crítico (CSL, por sus siglas en inglés) de la gradación promedio del mineral. Los ensayos triaxiales CU capturan el desarrollo de esfuerzos dentro de una muestra de suelo sin permitir la variación volumétrica, pero midiendo la variación de presión de poros, mientras que con el CD la variación volumétrica si es permitida y es medida. Los ensayos son realizados a la mínima y máxima densidad, en los triaxiales CU y CD respectivamente, para simular la condición de un suelo suelto y denso respectivamente y de esta forma llevar a la muestra de mineral a su estado crítico.

Los ensayos triaxiales fueron realizados en una mezcla de muestras extraídas a una profundidad entre 26,85 m y 41,00 m que corresponden a las de sondajes sínicos expuestos en el acápite 3.5.1.1.1. La mezcla de mineral lixiviado es clasificada como una arena arcillosa con grava (SC) presentando 16,3% de finos y una plasticidad $IP=10$. La muestra fue cortada a la malla N°4 y presenta un diámetro que representa el 50% de porcentaje acumulado que pasa (D_{50}) de 0,52 mm. A continuación, en la Tabla 3.6, se resume los parámetros de la línea de estado crítico obtenidos:

Tabla 3.6
Resumen CSL - Muestras de mineral lixiviado

Características físicas					Características mecánicas			
D_{50} (mm)	Finos (%)	$e_{máx}$	$e_{mín}$	G_s	Γ	λ_{10}	M_{tc}	χ_{tc}
0,52	16,3	1,267	0,297	2,81	0,5271	0,03	1,304	4,958

Abreviaturas:

D_{50} : Diámetro que representa el 50 % de porcentaje acumulado que pasa en la curva granulométrica

e : Relación de vacíos

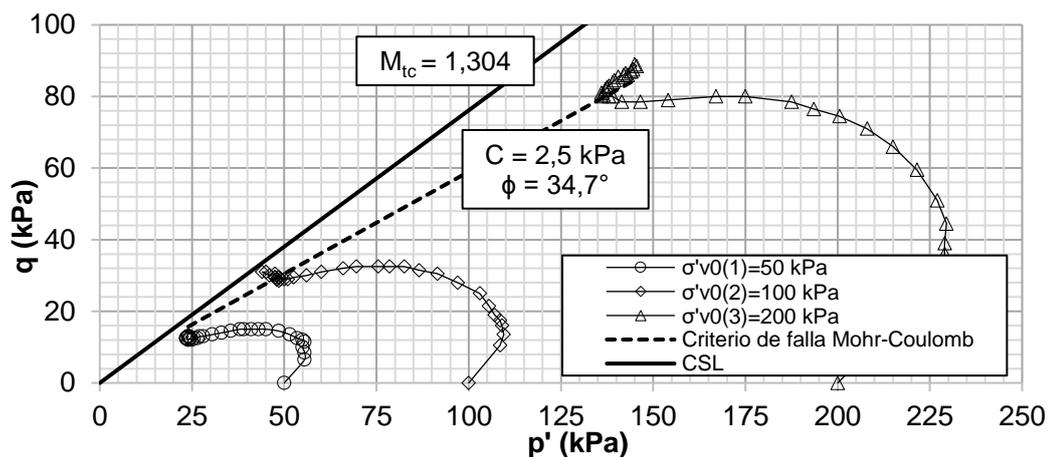
G_s : Gravedad específica de sólidos

M_{tc} : Relación de fricción crítica (*critical friction ratio*) χ_{tc} : estado de la dilatancia (*State - dilatancy*)

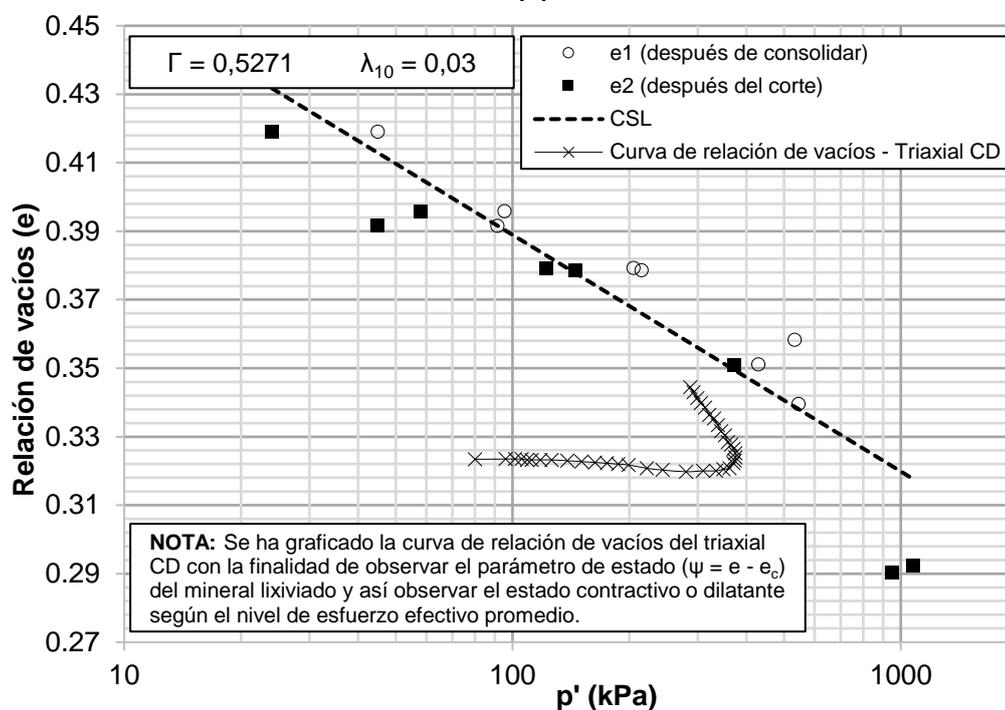
Nota:

1. Los parámetros Γ y λ_{10} son propiedades intrínsecas del suelo.

Por otro lado, en la Figura 3.15 se muestra la obtención de las características mecánicas de la CSL del mineral lixiviado.



(a)



(b)

Figura 3.15 (a) Trayectoria de esfuerzos efectivos del ensayo triaxial CU. **(b)** Línea de estado crítico (CSL).

La Figura 3.11 muestra que el mineral lixiviado ensayado se encuentra en estado denso pudiendo dilatarse llegando a una condición cercana al estado crítico.

Las características mecánicas se describen a continuación:

- Los parámetros Γ y λ_{10} al ser propiedades intrínsecas del suelo, estos no se ven afectados por los equipos de laboratorio, la historia de esfuerzos de las muestras de mineral, relación de vacíos, entre otros. Estos valores forman parte de la correlación de la CSL que es representada por la

siguiente ecuación: $e_c = \Gamma - \lambda_{10} \ln(p'_c)$ donde e_c es la relación de vacíos crítica y el p'_c es el confinamiento efectivo promedio crítico.

- La relación de fricción crítica (M_{tc}) corresponde a la relación entre los esfuerzos efectivos p' y q a un nivel de deformación donde el esfuerzo desviador comienza a ser constante y la muestra sigue deformándose.
- El estado de la dilatancia (χ_{tc}) es una propiedad que relaciona el parámetro de estado del suelo con la dilatancia. Esta propiedad es definida en un ensayo de compresión triaxial drenado.

La importancia de poder contar con la CSL del mineral lixiviado radica en la necesidad de contar con los parámetros M_{tc} y λ_{10} para obtener la resistencia licuada S_{uLIQ}/σ'_{v0} a través de la metodología propuesta por Jefferies y Been (2016).

3.5.3 Ángulo de fricción interna en condiciones drenadas

En la Figura 3.16 se observa el ángulo de fricción interna obtenida mediante correlación de los 9 sondajes SCPTu.

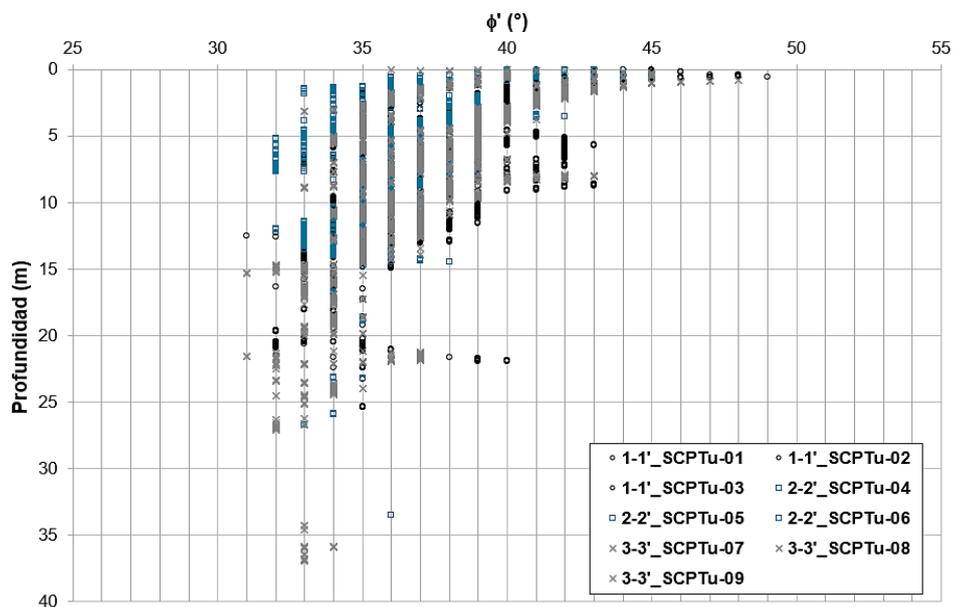


Figura 3.16 Ángulo de fricción interna (ϕ') obtenidos de los sondajes SCPTu.

El ángulo de fricción interna será asignado al mineral lixiviado que muestre un comportamiento *sand-like* drenado dilatante y ha sido obtenido mediante la siguiente correlación propuesta por Kulhawy y Mayne (1990), donde Q_{tn} es la resistencia de punta normalizada.

$$\phi' (\text{°}) = 17,6 + 11\text{Log}(Q_{tn})$$

Dado que el objetivo de la presente investigación es caracterizar las zonas dominadas por finos y contractivas en mineral lixiviado según lo mostrado en la Tabla 3.4, en el caso del mineral en condiciones drenadas se adoptará un solo valor según el conjunto de datos mostrados en la Figura 3.16, cuyas características se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7
Distribución de datos correspondiente al ϕ' (°)

n	mín (°)	máx (°)	μ	σ	C.V. (%)	P16	P50	P84
4646	31	49	37	2,84	7,7%	34	36	40

Símbolos y abreviaturas:

n: número de datos

μ : promedio

σ : desviación estándar

C.V.: coeficiente de variación

P16: percentil 16

P50: percentil 50

P84: percentil 84

Se observa de la Tabla 3.7 que el C.V. es ~8% mostrando que los datos son homogéneos, y si bien los datos son prácticamente homogéneos, de forma conservadora se adopta un valor, para el mineral en condiciones drenadas, un ángulo de fricción interna en término de esfuerzos efectivos (ϕ') de 34° y cohesión nula con un peso específico de 19 kN/m³. A continuación, en la Figura 3.17 se muestra el histograma de los valores de ϕ' (°).

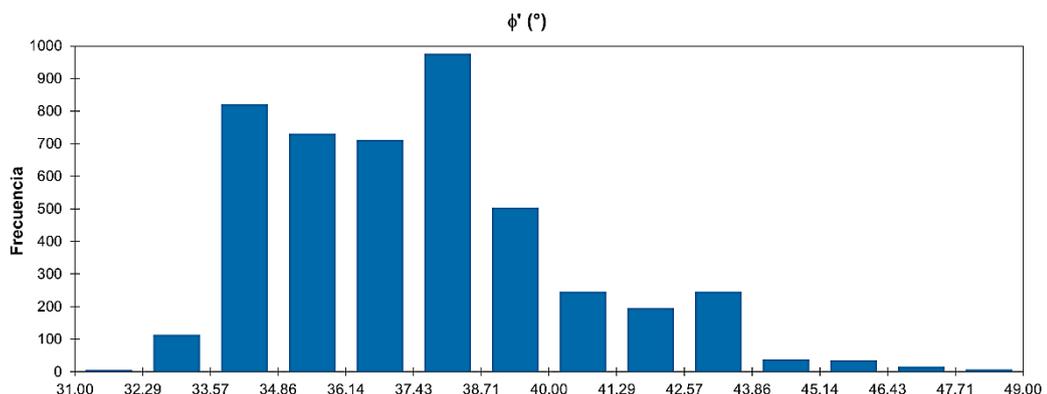


Figura 3.17 Histograma correspondiente a los valores ϕ' (°) registrados.

3.5.4 Relación de resistencia no drenada (S_u/σ'_{v0})

La relación de resistencia no drenada (S_u/σ'_{v0}) será asignada al mineral lixiviado del tipo *clay-like* descrito en la Tabla 3.4. Gran parte del mineral del tipo *clay-like*

identificados en todos los sondajes presentan valores de relación de resistencia no drenada pico ($S_{u_{peak}}$) mayores a 0,50 (valor máximo de S_u/σ'_{v0} en ensayos triaxiales CU ejecutados en mineral lixiviado de la pila estudiada) debido principalmente a la alta rigidez que presenta el mineral lixiviado a pequeñas deformaciones evidenciado por sus perfiles de velocidad de ondas de corte y por sus valores del índice de rigidez normalizado (K_G) mayores a 330 (ver Figura 3.18) que es adoptado como un valor de frontera con el que se caracteriza a un suelo con microestructura.

Se adoptó lo recomendado por Robertson (2016) que considera la resistencia neta del cono (q_n) en reemplazo de la q_t , i.e. $I_G = G_{MAX}/q_n$ donde $q_n = q_t - \sigma_v$. La resistencia q_n fue considerada por Robertson (2016) para extender la formulación de Schneider y Moss (2011) que incluya a suelos blandos ya que q_n es una medida directa de la resistencia del mineral de comportamiento del tipo *clay-like*. Por lo tanto, el índice de rigidez normalizado se formula como sigue:

$$K_G^* = \left(\frac{G_{MAX}}{q_n} \right) Q_{tn}^{0,75}$$

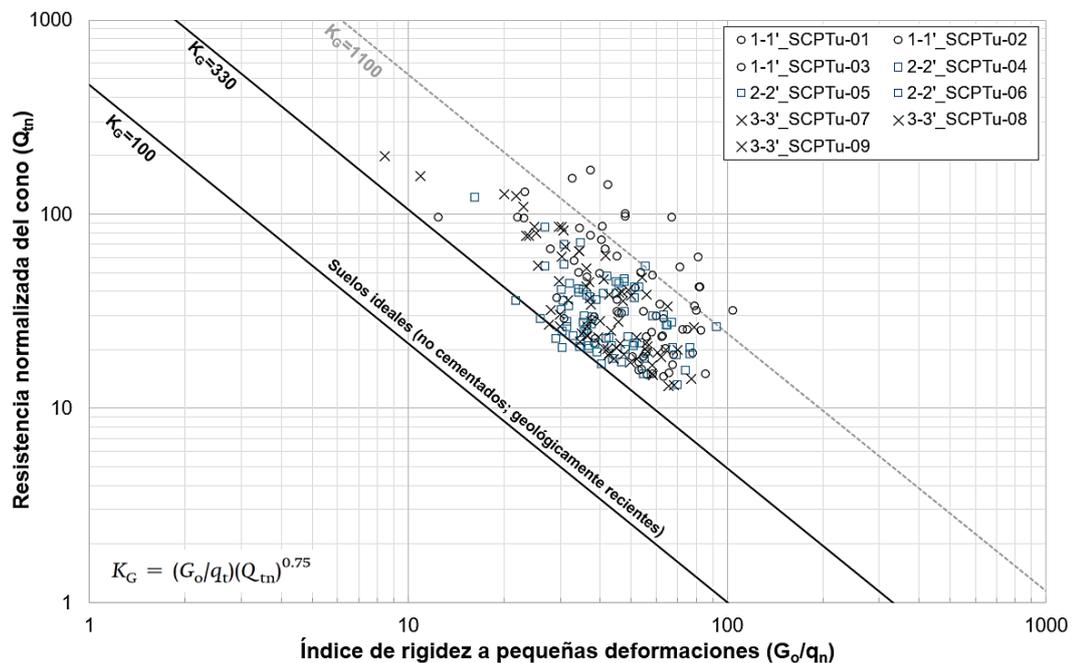


Figura 3.18 Microestructura presente en el mineral lixiviado auscultado.

La microestructura también influye en la resistencia cíclica del mineral lixiviado. Cuando este está sujeto a carga cíclica de baja amplitud puede incrementar la resistencia (Landa, 2022), sin embargo, dada la alta sismicidad del sitio es

coherente inferir que los efectos de microestructura se perderán. Por lo tanto, aquí se ha desestimado la influencia de la microestructura en el análisis.

Según lo expuesto en el acápite 2.5.1 se ha obtenido la relación de resistencia no drenada remoldeada ($Su_{remoldeada}/\sigma'_{v0}$). Se debe poner énfasis que los 09 sondajes SCPTu que fueron ejecutados en una zona de la pila de lixiviación estudiada en la presente investigación, no se encontraba en riego, por lo que las cargas de presión remanentes en dicho sector se encuentran aún en disipación y lo que se ha registrado en esta última campaña presenta cargas de presión de una magnitud presumiblemente menor de las que podrían obtenerse durante el riego, pudiendo así impactar en la resistencia por punta (q_t o Q_t) del ensayo CPT que pueden ser menores si los ensayos hubieran sido realizados sobre mineral durante el riego o inmediatamente después del mismo; dicho efecto no es abordado en la presente investigación. Finalmente, se ha adoptado un valor de N_{kt} de 14 que corresponde a un valor promedio recomendado en Robertson y Cabal (2022). En la Figura 3.19 se presenta la recopilación de la resistencia no drenada remoldeada.

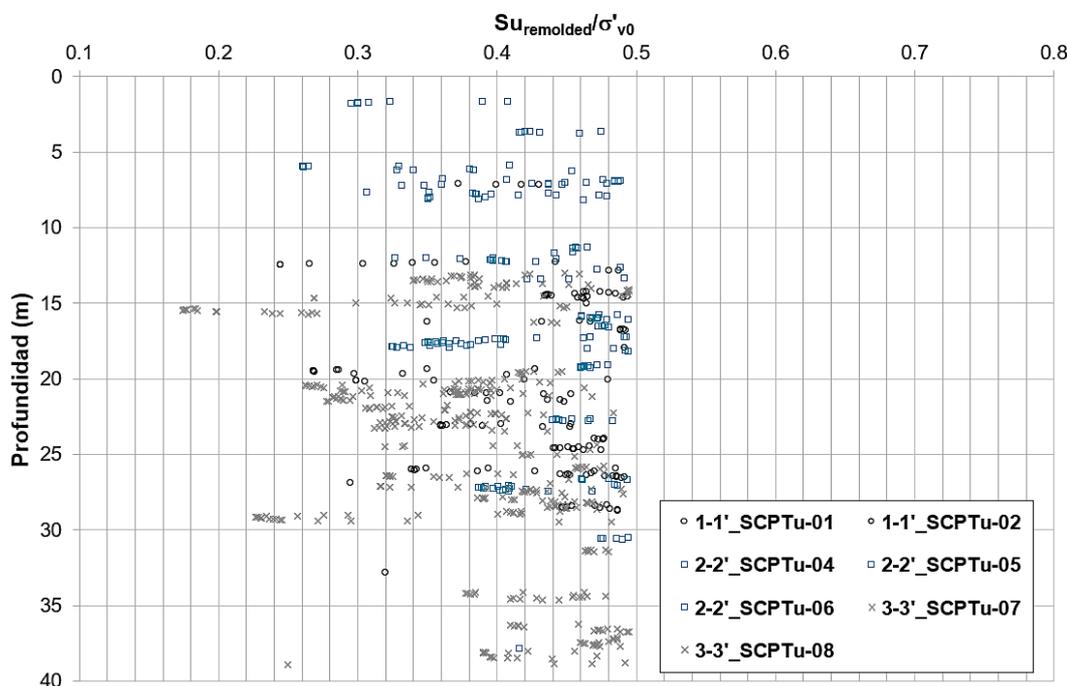


Figura 3.19 Valores $Su_{remoldeada}/\sigma'_{v0}$ registrados en los sondajes SCPTu.

En la Figura 3.19 se observa la ausencia de los sondajes SCPTu-03 y SCPTu-09 debido a que en estos se presentó comportamiento solo del tipo *sand-like*; y además, se ha prescindido de $Su_{remoldeada}/\sigma'_{v0} \geq 0,50$. En general, las estimaciones

derivadas del SCPTu con respecto a $S_{u_{remolded}}/\sigma'_{v0}$ indican que la condición drenada es la que domina en el escenario estático. A continuación, se muestra la Tabla 3.8 donde se observa la distribución de los datos correspondientes a $S_{u_{remolded}}/\sigma'_{v0}$.

Tabla 3.8
Distribución de datos correspondiente al $S_{u_{remolded}}/\sigma'_{v0}$

Sección	n	mín	máx	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
1-1'	133	0,24	0,49	0,42	0,07	16,1%	0,34	0,45	0,48
2-2'	185	0,26	0,49	0,42	0,06	13,3%	0,35	0,43	0,48
3-3'	442	0,17	0,49	0,39	0,07	18,7%	0,31	0,39	0,46

Símbolos y abreviaturas:

n: número de datos

μ : promedio

σ : desviación estándar

C.V.: coeficiente de variación

P16: percentil 16

P50: percentil 50

P84: percentil 84

Según el estándar de la práctica geotécnica al adoptar resistencias del suelo a través de una distribución de datos, en los análisis estáticos no drenados se utilizarán los valores $S_{u_{remolded}}/\sigma'_{v0}$ (P16) en los materiales con comportamiento *clay-like*.

3.5.5 Relación de resistencia no drenada de fluencia ($S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$)

Según lo descrito en el acápite 3.4.1, la pila de lixiviación estudiada presenta zonas dominadas por finos (con esfuerzos y deformaciones iniciales representado por el punto A', ver acápite 2.5.2) que retendrán solución, y al apilarse nuevas celdas, *lifts* o capas de mineral y al aplicarse el riego, se producirá un exceso de presión de poros; luego, asumiendo de forma conservadora que el mineral dominado por finos desarrollará una condición no drenada, y bajo la aplicación de una carga sísmica (en el Capítulo IV se describe que la sismicidad de la zona de emplazamiento de la pila es alta) la condición comenzará a moverse del punto A' hacia el E (ubicado sobre la envolvente de resistencia de fluencia o *yield strength envelope*, ver acápite 2.5.2). Si bien en el punto E se activará la licuación moviéndose la condición del punto E hacia el C (ver Figura 2.12), en la presente investigación se adoptará de forma conservadora que en las capas dominadas por finos que bajo en la evaluación del potencial de licuación (que se abordará en el Capítulo IV) no sean licuables, adoptará una resistencia de fluencia $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$.

Por otro lado, la Tabla 3 de Olson y Stark (2003) muestra que los materiales en los casos historia recopilados presentan contenido de finos, por lo que refuerza la adopción de esta formulación para caracterizar a las zonas dominadas por finos luego de aplicar una carga sísmica.

La formulación propuesta por Olson y Stark (2003) se muestra a continuación:

$$\frac{S_{u(\text{yield})}}{\sigma'_{v0}} = 0,205 + 0,0143(q_{c1}) + 0,04 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6,5 \text{ MPa}$$

Donde q_{c1} corresponde a la resistencia por punta corregida del CPT [$q_{c1}=(q_t) \times (100/\sigma'_{v0})^2$]. Por otro lado, en la Figura 5 de Olson y Stark (2003) se observa que los casos historia con materiales con mayor contenido de finos se ubican en el límite superior de la correlación propuesta. La Figura 3.20 muestra los valores $S_{u(\text{yield})}/\sigma'_{v0}$ obtenidos mediante la correlación propuesta por Olson y Stark (2003) para los sondajes SCPTu ejecutados en la pila de estudio.

Dado que esta resistencia será la característica de las zonas dominadas por finos (ver Tablas 3.4 y 3.5), se asignará una resistencia característica para la profundidad de cada zona de cada sondaje SCPTu procesado. En el Capítulo V se especificará los valores de $S_{u(\text{yield})}/\sigma'_{v0}$ asignados a dichas zonas.

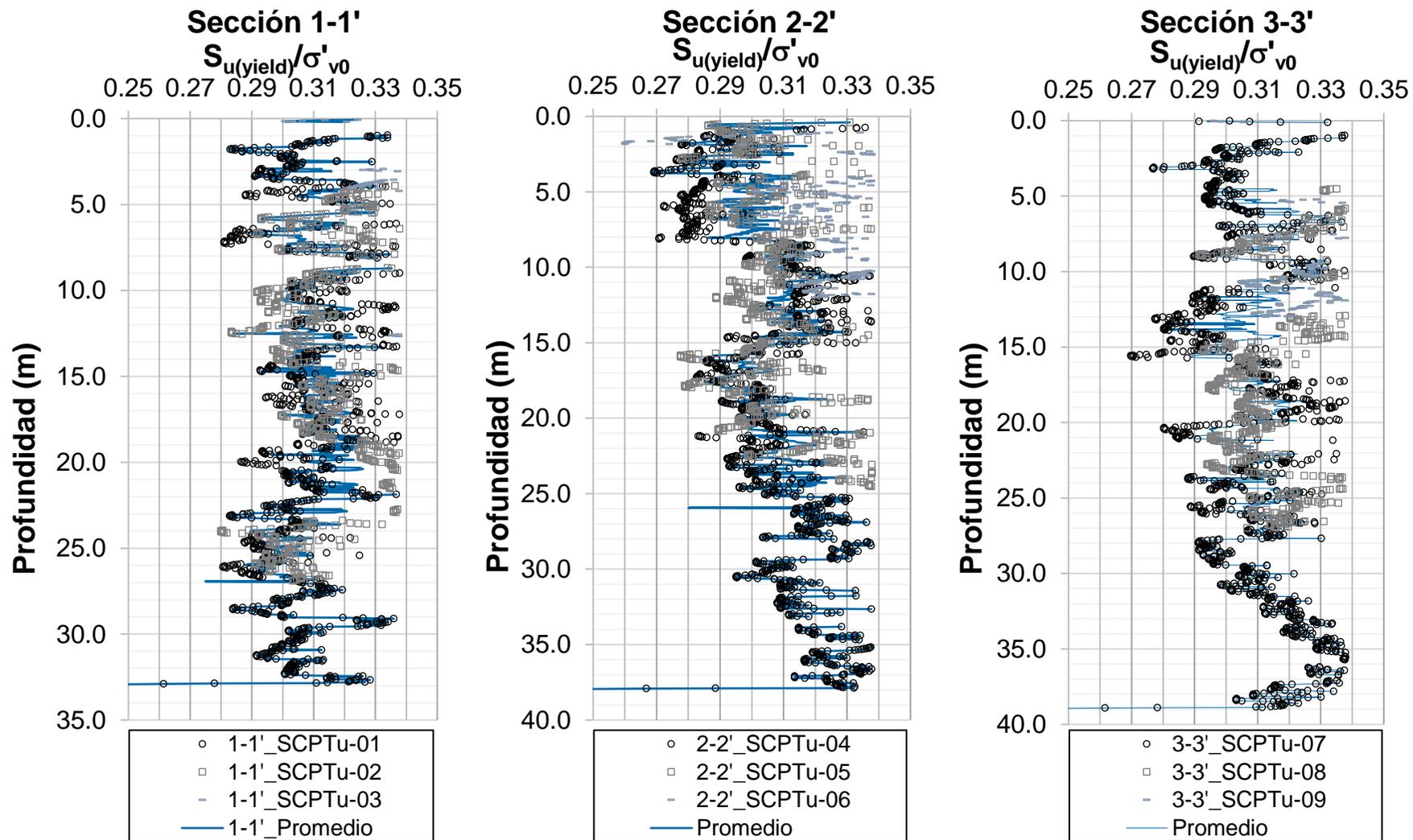


Figura 3.20 Valores $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ obtenidos a partir de los sondajes SCPTu

3.5.6 Parámetro de estado (ψ)

Una de las ventajas que nos ofrecen los sondajes SCPTu es que nos proporciona información de forma continua sobre el comportamiento, características y el estado *in situ* del material estudiado; donde este último puede ser interpretada a partir del parámetro de estado (ψ). La estimación del ψ es requerida para identificar al mineral lixiviado contractivo (*i.e.* presenta un comportamiento del tipo *strain-softening*) donde su resistencia cortante no drenada disminuye al presentar ablandamiento deformacional, y diferenciarlo de uno dilatante (*i.e.* presenta un comportamiento del tipo *strain-hardening*) donde su resistencia cortante no drenada presenta una respuesta de endurecimiento deformacional. A continuación, se detallará las metodologías abordadas en el presente estudio para obtener el perfil del ψ en cada sondaje SCPTu.

3.5.6.1 Registros obtenidos aplicando Plewes et al. (1992)

La Figura 3.21 muestra los ψ obtenidos mediante Plewes et al. (1992) (ver acápite 2.3.1.1) en el espacio $F_R(\%)$ vs $Q_p(1-B_q)+1$ (Shuttle y Cuning, 2008).

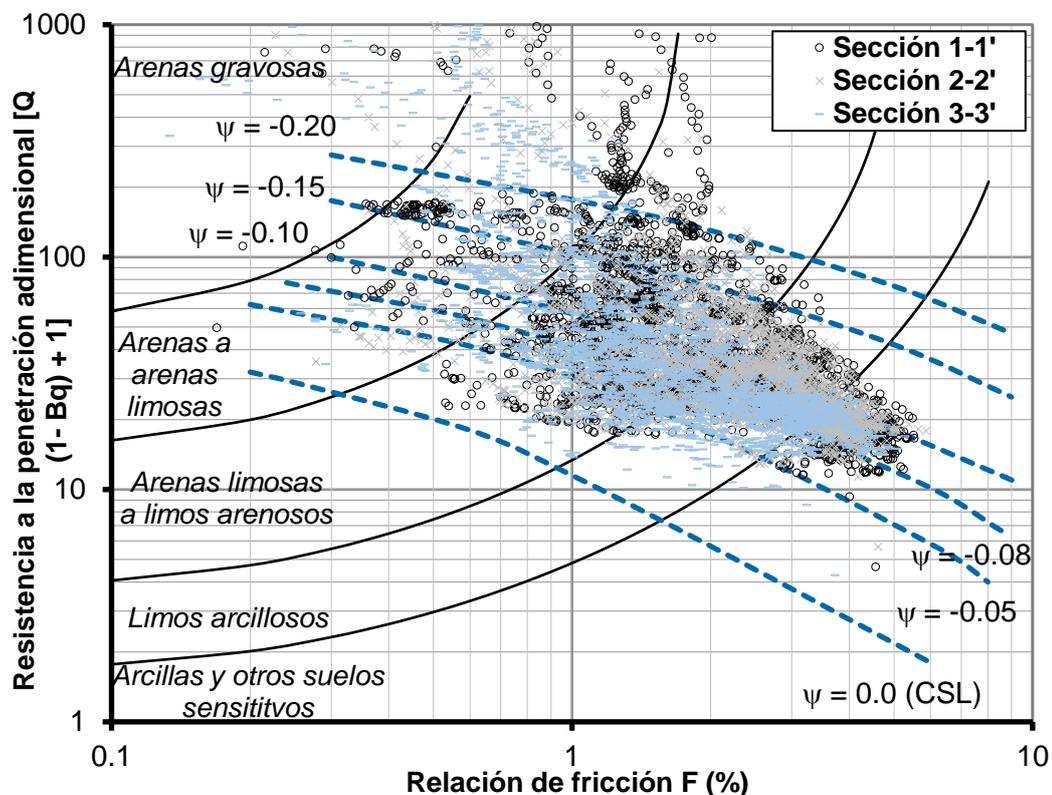


Figura 3.21 ψ calculados por Plewes et al. (1992).

3.5.6.2 Registros obtenidos aplicando Robertson (2010b)

La Figura 3.22 muestra los ψ obtenidos según Robertson (2010b) (ver acápite 2.3.1.2) en el espacio $F_r(\%)$ vs Q_{tn} (Robertson, 2009a).

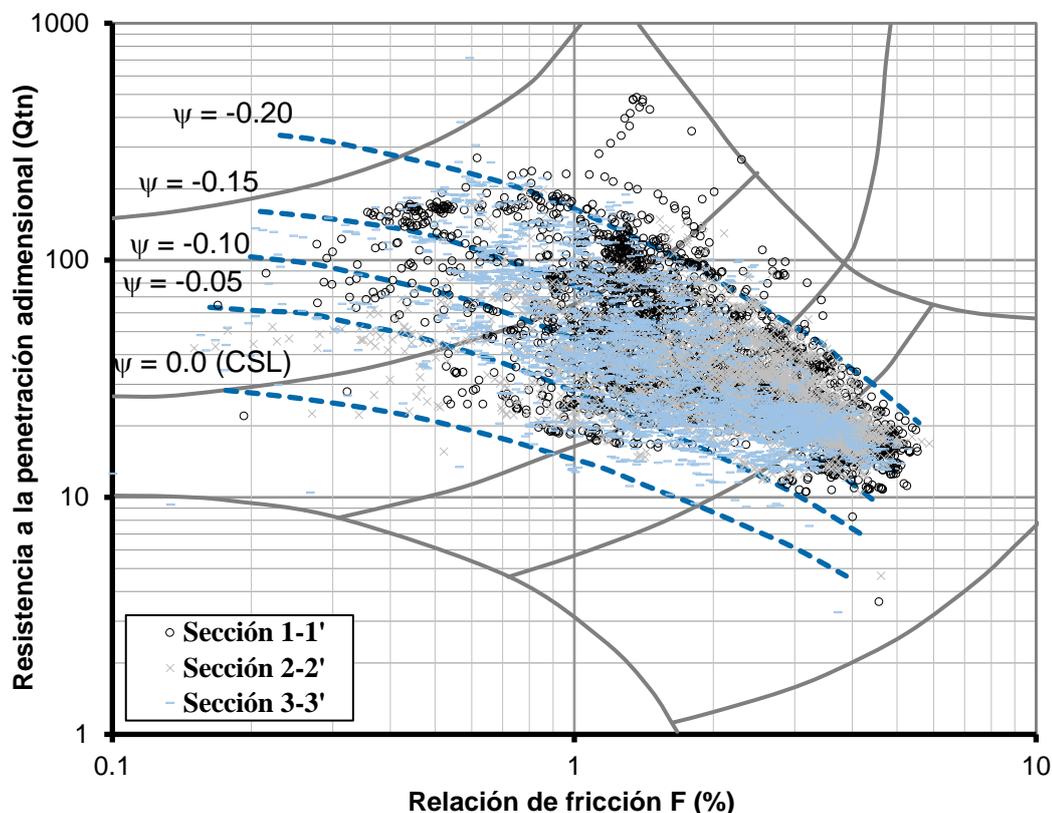


Figura 3.22 ψ estimados según formulación propuesta por Robertson (2010b).

3.5.6.3 Valores ψ registrados

Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran la variabilidad del ψ para el mineral lixiviado auscultado a través de sondajes SCPTu, donde la principal diferencia radica en que la primera formulación captura la compresibilidad del suelo mediante el $F_r(\%)$ e incluye parámetros de la teoría del estado crítico para calcular ψ ; mientras que la segunda, relaciona directamente el estado *in situ* del suelo con la resistencia normalizada del piezocono a través de $Q_{tn,cs}$. Además, la primera formulación toma en cuenta la carga de presión de poros en la resistencia por punta normalizada, a través de la formulación propuesta por Been *et al.* (1988) y actualizada por Shuttle y Cuning (2007), a fin de considerar la condición de drenaje del suelo y asociarlo a la compresibilidad capturada a través del $F_r(\%)$.

La literatura técnica recomienda adoptar una frontera de $\psi = -0,05$ para identificar a los materiales contractivos. Sin embargo, como se indicó en el acápite 3.5.4 sobre la influencia del riego en la resistencia por punta (q_t , Q_t), se adoptará el criterio de emplear una frontera de $\psi = -0,08$ a fin de tener cierta holgura ante este efecto, ya que el estado inicial del mineral puede cambiar por efecto del riego de solución. La frontera $\psi = -0,08$ define un límite del que es poco probable que, por debajo de esta ($\psi < -0,08$), el mineral lixiviado desarrolle una transformación de fase o que este pueda cambiar su estado durante la operación o terremoto de uno dilatante a uno contractivo con facilidad. Lo indicado, se adopta como una línea base en el criterio de evaluación del estado contractivo actual de algunas capas del mineral lixiviado.

Las Figuras 3.23 a la 3.25 muestran los perfiles de los ψ obtenidos a través de las dos formulaciones abordadas anteriormente y los valores promedio que serán los representativos de cada sondaje SCPTu evaluado, y que serán utilizados para obtener la S_{uLIQ}/σ'_{v0} y en la evaluación del potencial de licuación. Además, se ha incluido la frontera $\psi = -0,08$ para observar en profundidad que materiales son contractivos y dilatantes.

Dichos perfiles de parámetro de estado (ψ) permitirán capturar el estado *in situ* del mineral tomando como base la resistencia normalizada del cono ($Q_{tn,cs}$) y la compresibilidad representada por la relación de fricción (F_r). Si bien no se ha realizado ensayos triaxiales para realizar simulaciones numéricas (como el de cavidad esférica por medio del modelo Norsand) para conocer cual formulación se adecúa de mejor manera al estado del mineral lixiviado por no ser parte del alcance del presente estudio de investigación, sin embargo, se ha considerado que el tomar un valor promedio de las formulaciones adoptadas ha mostrado que es representativo dado que se basan en las características del comportamiento del mineral de importancia para la pila evaluada (*i.e.* $Q_{tn,cs}$ y F_r), y además, dicho perfil promedio se encuentran en medio de las dos formulaciones (ver Figuras 3.23 a la 3.25), donde se ha evidenciado que la formulación de Plewes *et al.* (1992) muestra valores más negativos que los mostrados por Robertson (2021), siendo esto coherente dado a que la primera introduce en su formulación la compresibilidad del mineral lixiviado.

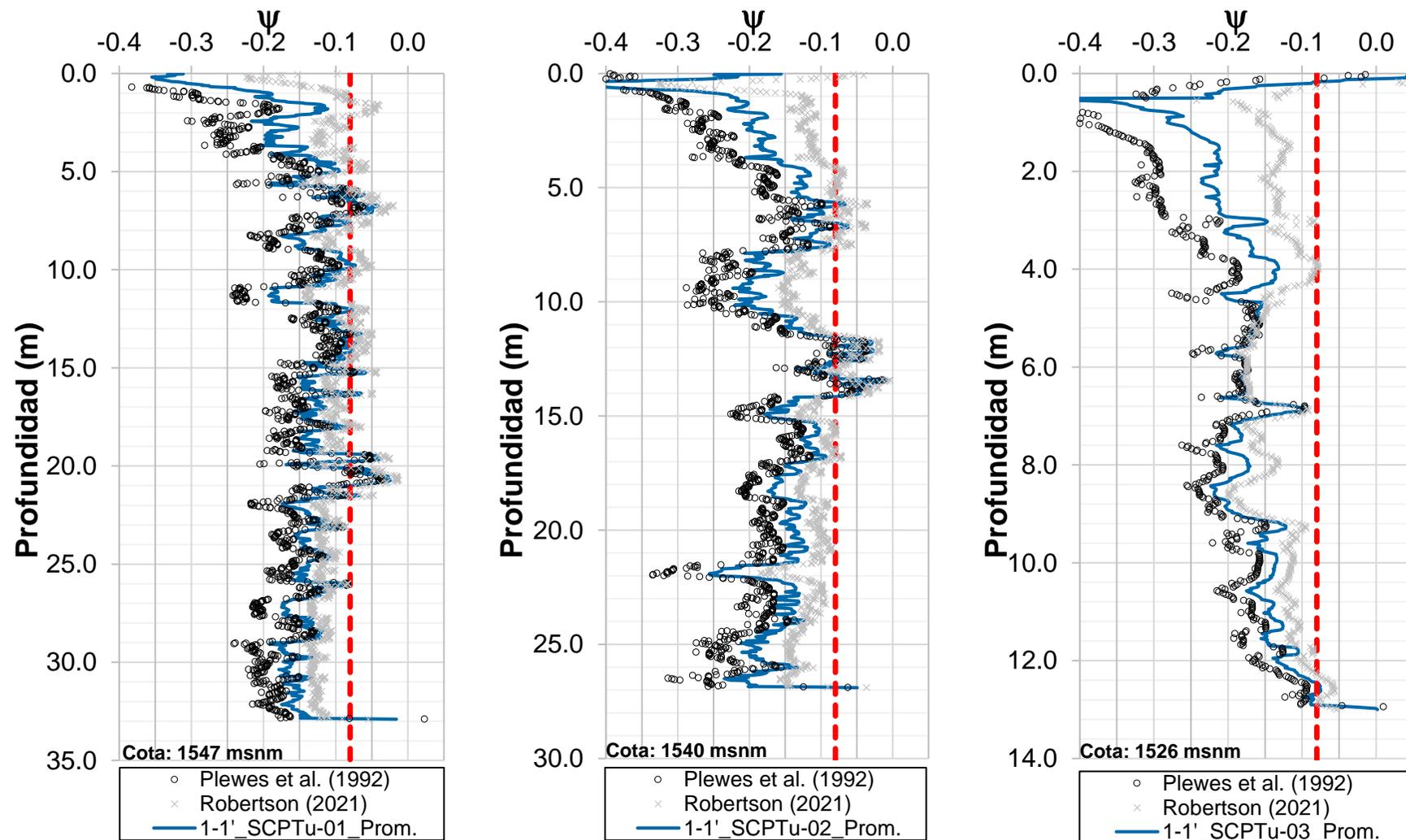


Figura 3.23 Perfiles de ψ promedio (Plewes *et al.*, 1992 y Robertson, 2010b) en la sección 1-1'.

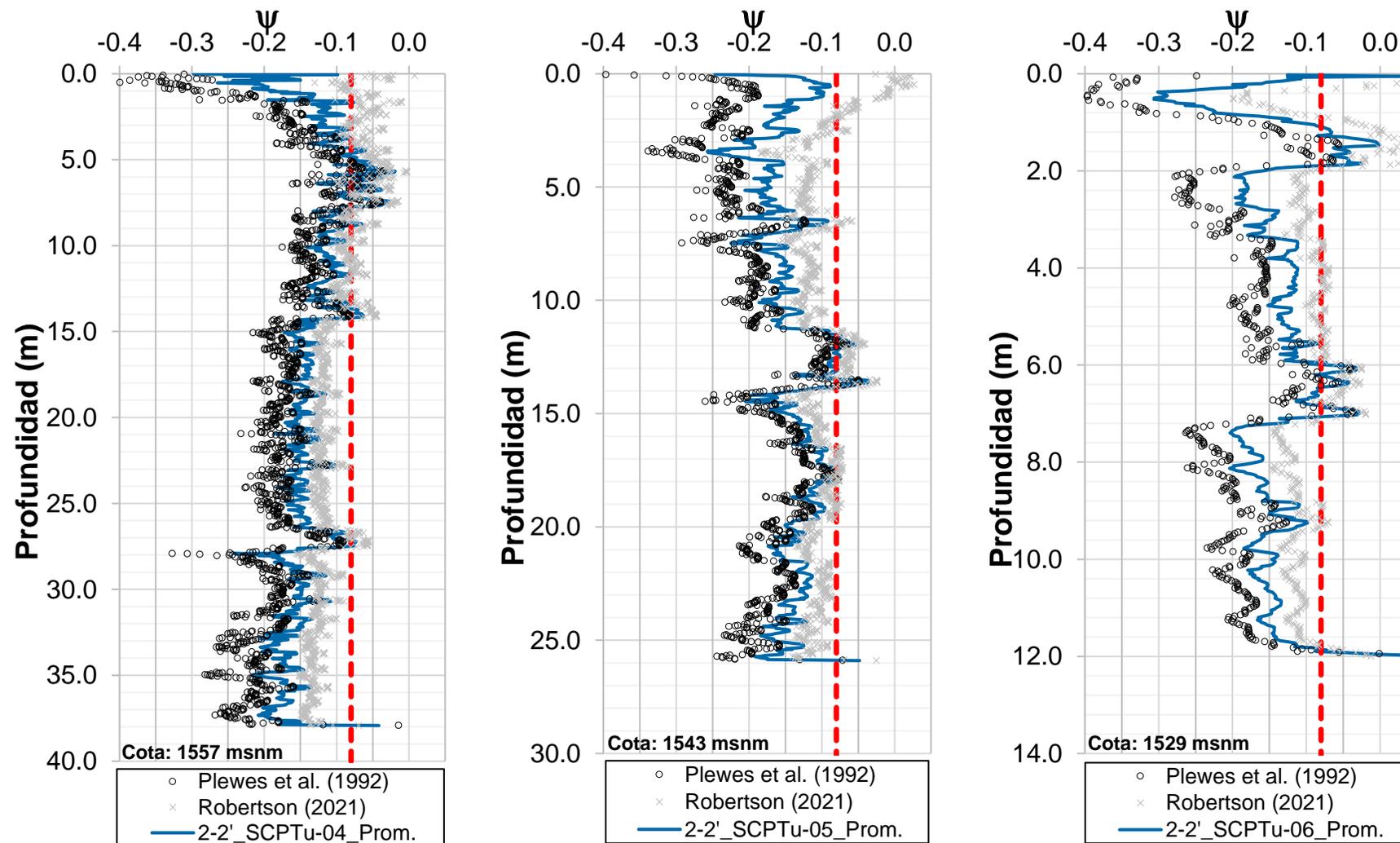


Figura 3.24 Perfiles de ψ promedio (Plewes *et al.*, 1992 y Robertson, 2010b) en la sección 2-2'.

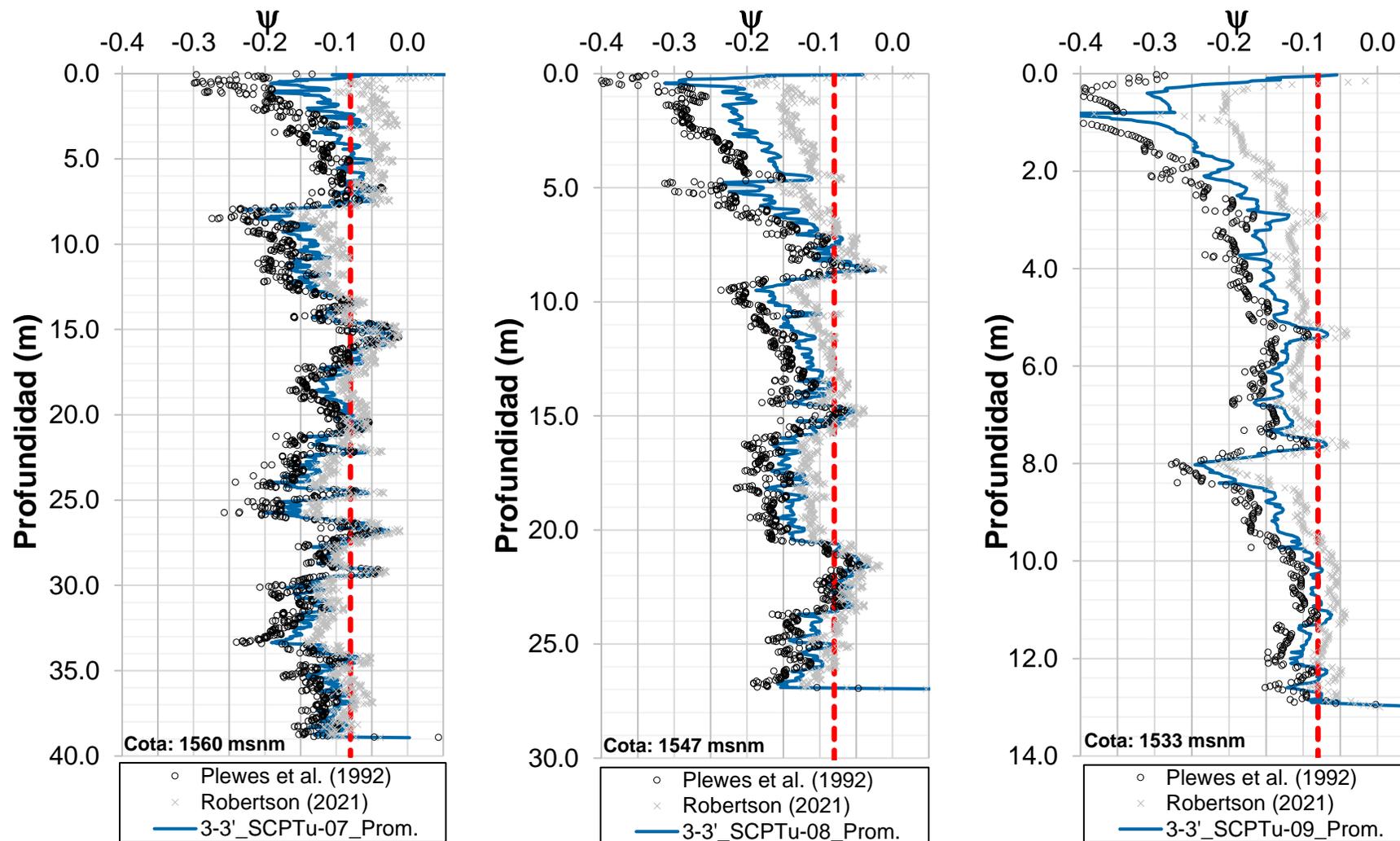


Figura 3.25 Perfiles de ψ promedio (Plewes *et al.*, 1992 y Robertson, 2010b) en la sección 3-3'.

3.5.7 Relación de resistencia no drenada licuada (S_{uLIQ}/σ'_{v0})

A continuación, se aplicarán las metodologías abordadas en el acápite 2.5.3 en el presente estudio para obtener el perfil de valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} .

3.5.7.1 Registros obtenidos aplicando Olson y Stark (2002)

En la Figura 3.26 se muestra los valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} obtenidos de los sondajes SCPTu a partir de la propuesta de Olson y Stark (2002) descrita en el acápite 2.5.3.1. Esta formulación no considera el SBT dentro de ella, pero se observa una tendencia de presentar valores de resistencias no drenada licuadas mayores en materiales con mayor porcentaje de finos (ver Figura 5 de Olson y Stark, 2002), por lo que en la presente investigación se adoptará el límite superior de la correlación propuesta.

3.5.7.2 Registros obtenidos aplicando Jefferies y Been (2016)

Una de sus ventajas es que la variación de los valores de S_{uLIQ}/σ'_{v0} se encuentran marcadamente diferenciados según su estado *in situ* (compresible, rígido o frágil e intermedio) caracterizados por el λ_{10} (y este a su vez con el $F_R(\%)$). Esto se observa en la Figura 3.27, donde el rango de los valores de la relación de resistencia licuada, obtenidos según lo descrito en el acápite 2.5.3.2, es más amplio en comparación de lo mostrado por Olson y Stark (2002) en la Figura 3.26, dado que los picos más bajos se relacionan con las zonas de mineral contractivas mientras que los más altos con zonas de mineral dominadas por finos con comportamiento dilatante (*clay-like* dilatantes).

3.5.7.3 Registros obtenidos aplicando Robertson (2021)

En la Figura 3.28 se muestra los perfiles de los valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} obtenidos para cada sondaje SCPTu evaluado según lo descrito en el acápite 2.5.3.3. Se observa que, a diferencia de los perfiles obtenidos a través de Olson y Stark (2002) y Jefferies y Been (2016), el perfil se ve limitado a profundidad dado que solo se presenta valores de materiales contractivos ($CD < 70$) con $Q_{in,cs} < 80$. Se confirma que los sondajes, en su mayoría, presentan mineral lixiviado con comportamiento dilatante que contractivo, pero esto no disminuye la importancia de poder identificar capas de material contractivo que pueda desarrollar flujo por licuación.

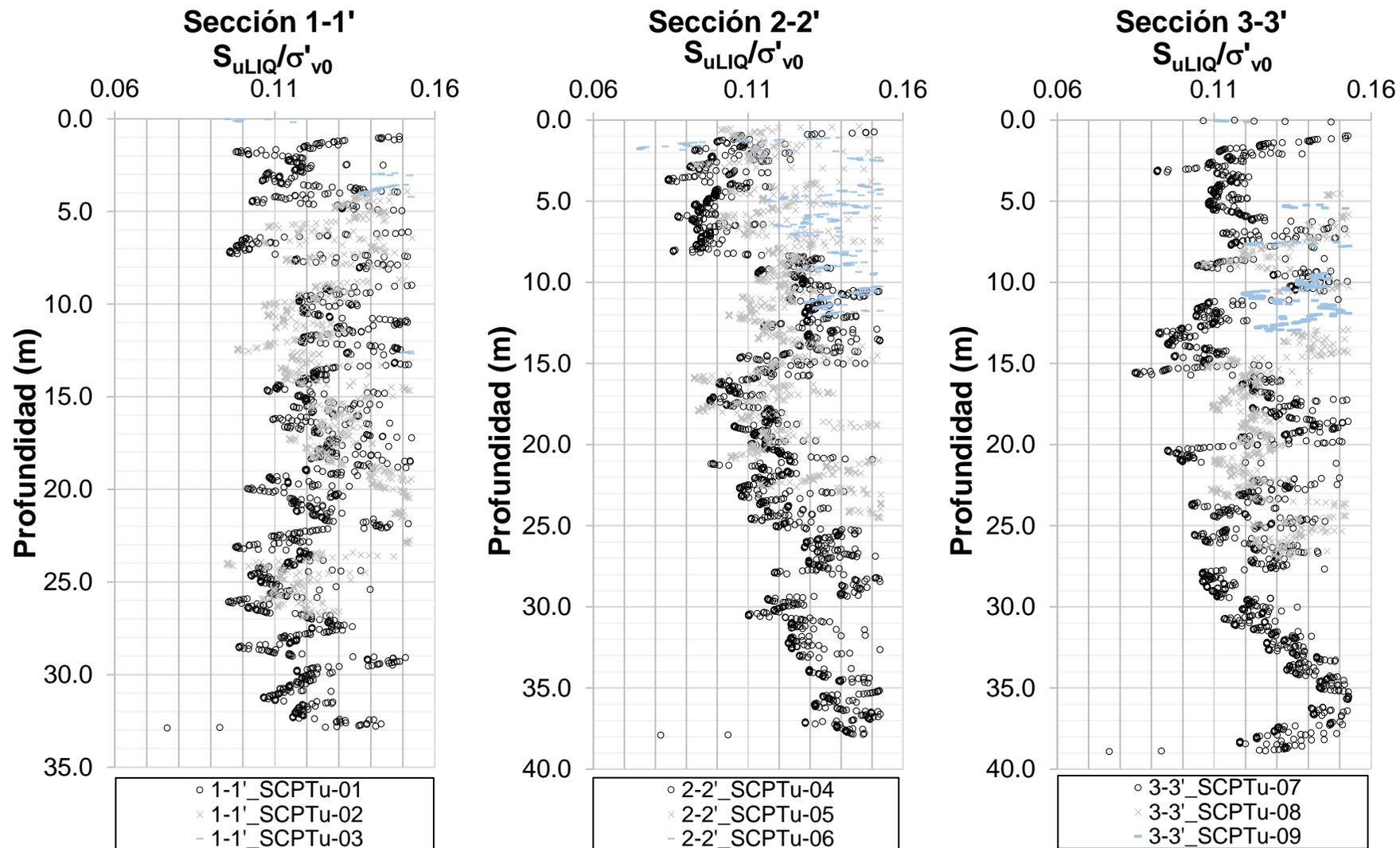


Figura 3.26 Perfiles de S_{uLIQ}/σ'_{v0} por Olson y Stark (2003)

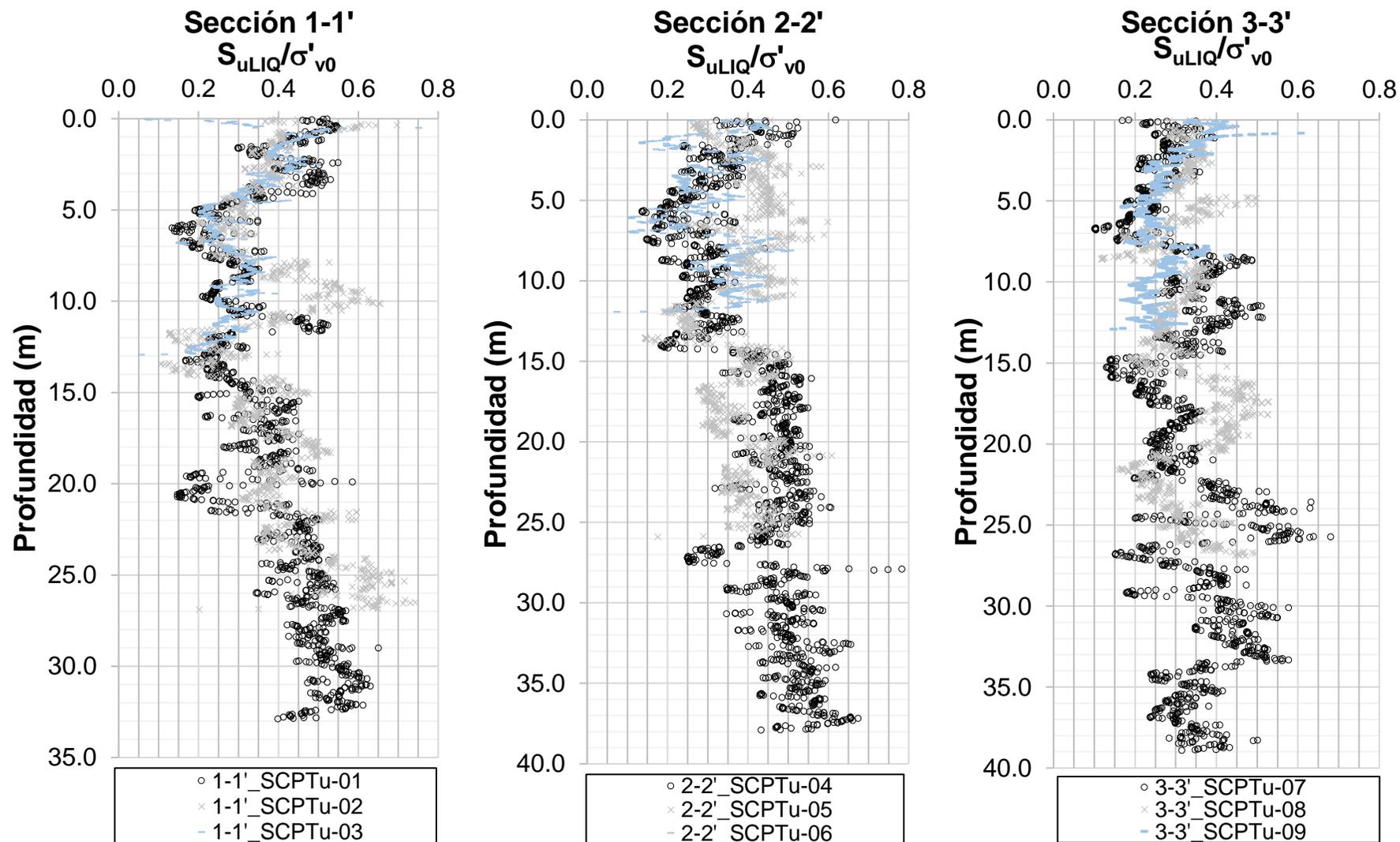


Figura 3.27 Perfiles de S_{uLIQ}/σ'_{v0} por Jefferies y Been (2016).

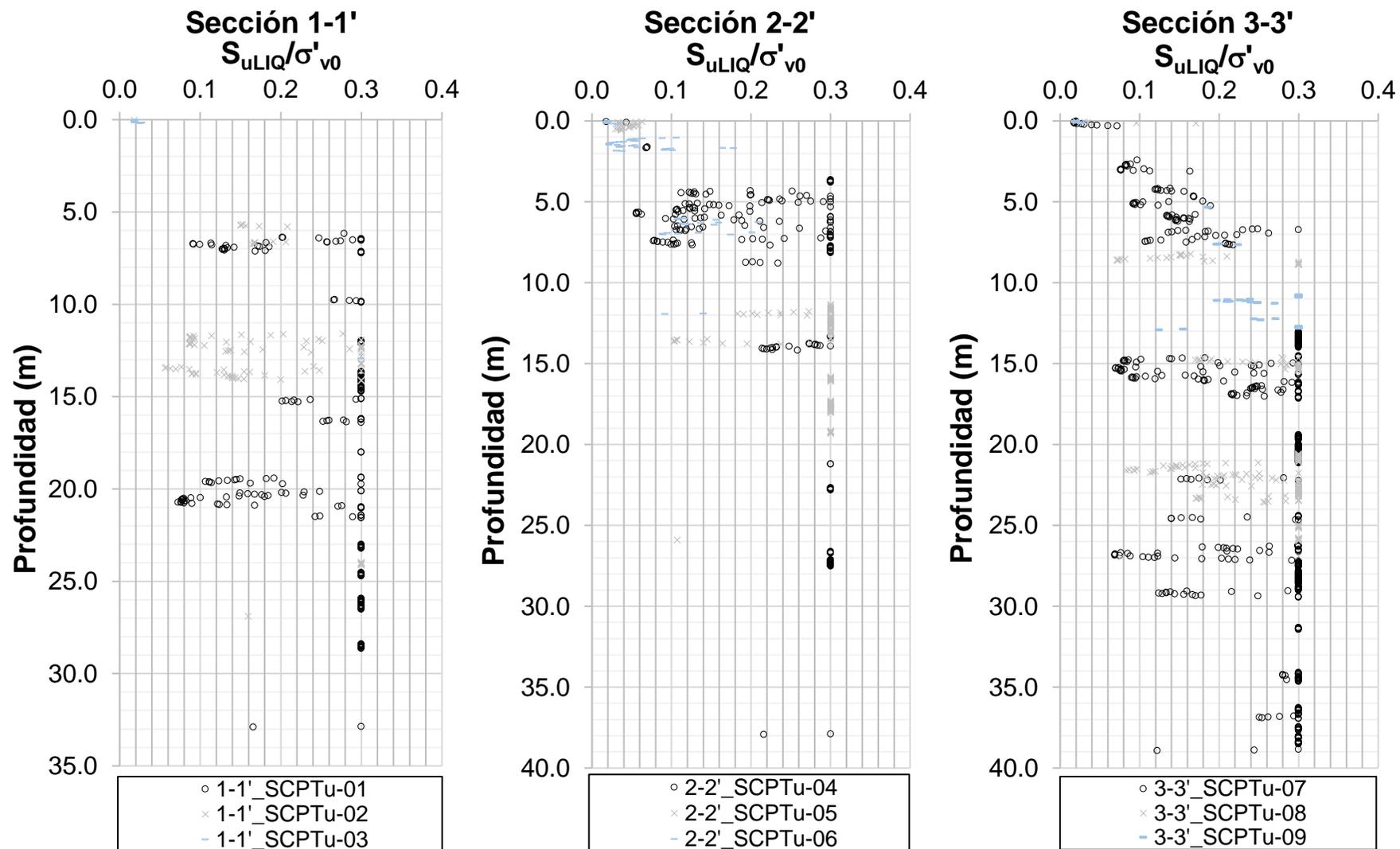


Figura 3.28 Perfiles de S_{uLIQ}/σ'_{v0} por Roberson (2021).

3.5.7.4 Valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} registrados

La presente investigación aborda 03 formulaciones para poder calcular los valores de S_{uLIQ}/σ'_{v0} por las ventajas que presentan como:

- Robertson (2021) permite relacionar la S_{uLIQ}/σ'_{v0} con el comportamiento del mineral (SBT) a través de los índices I_C e I_B .
- Jefferies y Been (2016) permite incluir la teoría del estado crítico en sus formulaciones y así poder explorar de forma más representativa las resistencias licuadas de capas de mineral a altos esfuerzos verticales (e.g. $\sigma'_{v0} > 500$ kPa).
- Olson y Stark (2003) permite poder obtener los valores de S_{uLIQ}/σ'_{v0} tomando como base una serie de retroanálisis de casos históricos de fallas por flujo por licuación.

Debido a que estas metodologías son empíricas y se basan principalmente en los mismos sondajes SCPTu, se ha realizado una ponderación de las resistencias licuadas obtenidas por cada formulación asignando el mismo peso para cada una, a fin de preservar por igual la influencia de cada ventaja presentada para cada formulación.

Los perfiles mostrados a continuación en la Figura 3.29, serán utilizados para obtener los valores de S_{uLIQ}/σ'_{v0} de las capas licuables obtenidas a través de la evaluación del potencial de licuación que se presentará en el siguiente capítulo.

Los valores de S_{uLIQ}/σ'_{v0} mostrados en los perfiles de la Figura 3.29 varían desde 0,05 hasta ~0,6 dado que son capturados en toda la profundidad de las secciones evaluadas permitiendo caracterizar materiales tanto contractivos como aquellos que muestran compresibilidad. De estos perfiles, se deberán tomar valores representativos de las capas licuables obtenidos a través de la evaluación del potencial de licuación que será desarrollada en el Capítulo IV, a fin de obtener de este modo resultados coherentes con el estado de la práctica geotécnica.

A continuación, se muestra los perfiles de los valores S_{uLIQ}/σ'_{v0} obtenidos para cada sondaje SCPTu evaluado:

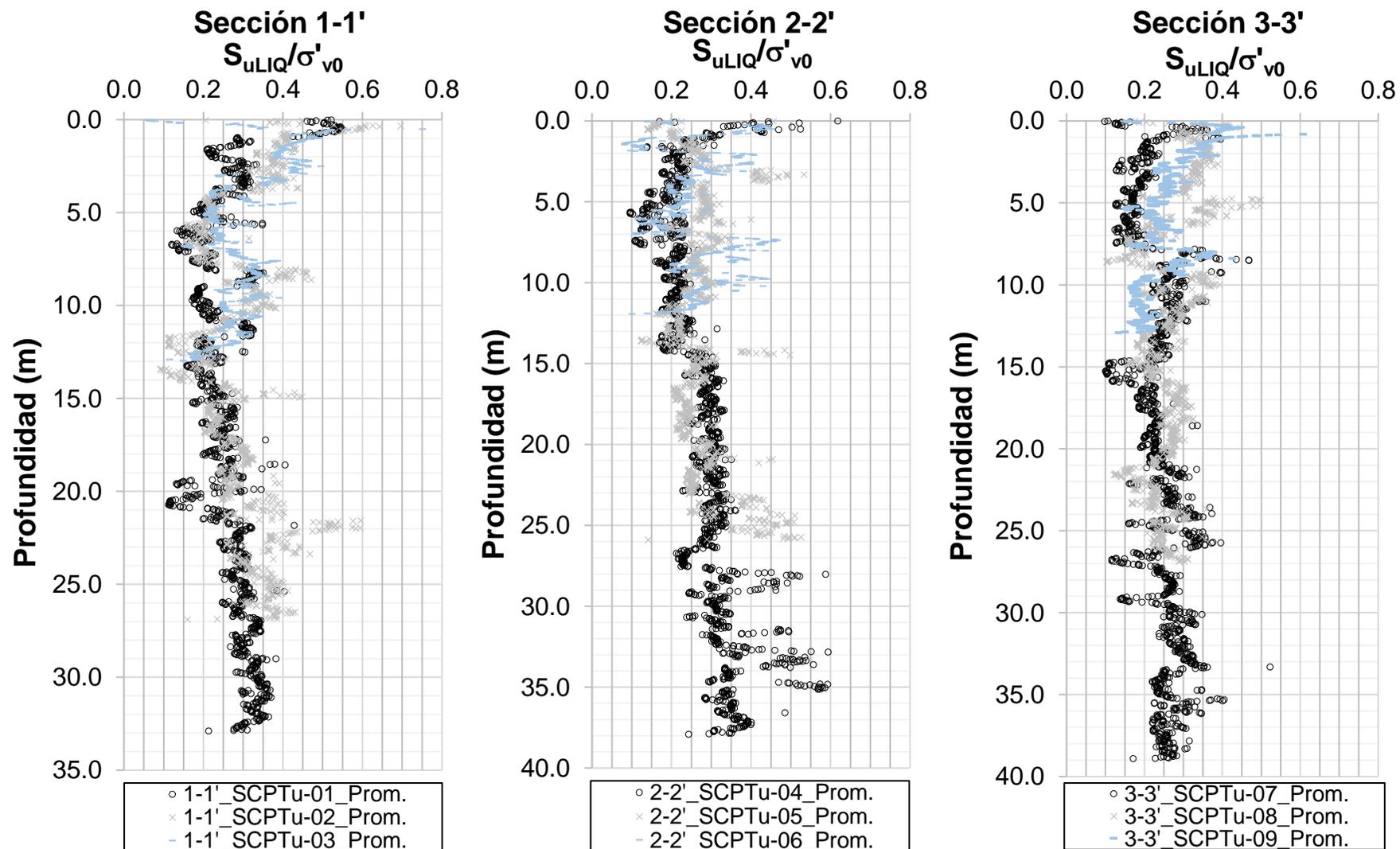


Figura 3.29 Perfiles de S_{uLIQ}/σ'_{v0} promedio (Olson y Stark, 2002, Jefferies y Been, 2016 y Robertson, 2021).

3.6 INTERFASE Y SUELO DE CIMENTACIÓN

La interfase de la pila corresponde a la geomembrana en contacto con el suelo de cimentación que, según criterios de diseño de estudios de ingeniería de la pila evaluada, ha sido caracterizada con $\phi = 25^\circ$ y $c = 0$ kPa. Asimismo, como se asumirá como un material en el modelo geotécnico, se le asignó $\gamma = 18$ kN/m³.

Por otro lado, a fin de evaluar la estabilidad de taludes principalmente en el cuerpo de la pila, se asignó una resistencia infinita a este material, y además, se consideró $\gamma = 24$ kN/m³.

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN EN MINERAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos simplificados propuestos para evaluar el potencial de licuación son ampliamente utilizados por la comunidad geotécnica ya que son confiables y conservadores. El uso del enfoque simplificado excluye los aspectos relacionados con la generación del exceso de presión de poros durante un terremoto, o con el cambio de volumen cuando se produce deformación cortante (*i.e.* su tendencia a contraerse o dilatarse) a fin de mantener el método simple y dejar que el esfuerzo efectivo sea definido fácilmente, asumiendo una relación incremental presión-profundidad constante bajo un régimen hidrostático supuesto.

Para una pila de lixiviación, esto debe ser examinado; dado que un perfil completamente saturado en un material que se coloca sin compactar se asume que presentará un desempeño del tipo *strain-softening*, es decir que el mineral es licuable desde la superficie hasta el revestimiento. En una pila de lixiviación con un mineral dominado por la presencia de finos, se esperan presiones de poro en equilibrio (u_0) como resultado de la retención de la solución en los poros del mineral, debido a que su permeabilidad es igual o menor a la tasa de riego aplicada; caso contrario sucede con las capas de mineral lixiviado de matriz gruesa, que usualmente presentan una permeabilidad alta y pueden drenar solución fácilmente. Dado que el mecanismo principal desencadenante de la licuación es la generación del exceso de presión de poros, y que el mineral de matriz gruesa no permite que u_0 surja consistentemente para inducir un exceso de presión de poros, las capas de mineral dominado por finos que se comportan como una arena o una arcilla contractiva sensitiva, son las que deben identificarse en una evaluación del potencial de licuación, en lugar de suponer que todo el perfil licúa, como suele ser el caso al emplear directamente el método.

En los últimos años, las correlaciones empíricas basadas en el SCPTu han mejorado la confiabilidad con la que estiman parámetros tratando de vincular lo medido *in situ* a través de las características de comportamiento (SBT), en reemplazo de las características físicas, con fundamento teórico a través de propiedades mecánicas o hidráulicas como la permeabilidad. Por ello se prefiere

el uso del SCPTu para la evaluación del potencial de licuación en pilas de lixiviación.

4.2 ASPECTOS GEOTÉCNICOS ASOCIADOS A LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

4.2.1 Relación K_{SAT} - I_C

En la presente investigación se ha clasificado al mineral de acuerdo con la conductividad hidráulica estimada a través de los parámetros del SCPTu tomando como patrón la K_{SAT} límite. Cualquier capa sobre la que se estime un valor inferior a la K_{SAT} límite se clasificará como mineral dominado por finos; y si se estima un valor superior se clasificará como mineral lixiviado drenado. La formulación presentada a continuación muestra la relación aproximada entre I_C y K_{SAT} para un rango de I_C entre 1,0 y 3,27, propuesta por Robertson (2010a) y se expresa de la siguiente manera:

$$K_{SAT} = 10^{(0,952-0,34I_C)} \quad \text{para } 1,0 < I_C \leq 3,27$$

Para evitar lidiar contra la variación aleatoria de las características físicas del mineral para calcular K_{SAT} para cada capa de mineral lixiviado dominado por finos, el equivalente mínimo de K_{SAT} para la tasa de riego adoptada en la operación de la mina debe estimarse mediante el índice de comportamiento normalizado del suelo (I_C). Para establecer los valores límite de la K_{SAT} equivalente, esta debe estar en función de la tasa de riego aplicada y al comportamiento del suelo mediante I_C . A continuación, se detalla los valores límites K_{SAT} adoptados en la evaluación de potencial de licuación:

- Permeabilidad teórica (K_{SAT} teórica): corresponde a aquella que equivale a la tasa de riego aplicada en la operación. En este caso, 10 L/h/m² equivale a $2,78 \times 10^{-4}$ cm/s (ver Tabla 3.1).
- Permeabilidad estándar: aquella 10 veces mayor (una orden de magnitud) a la K_{SAT} teórica. En este caso, $2,78 \times 10^{-3}$ cm/s (ver Tabla 3.1). Este factor se usa en el diseño de pilas lixiviación para absorber toda desviación que surge durante el transporte, apilamiento, distribución, ripeo y riego del mineral y que afectan la permeabilidad del mineral fresco.
- Permeabilidad mínima permitida: en la pila evaluada en la presente investigación se conoce de la presencia de capas de mineral lixiviado que

están dominadas por su matriz fina (ver acápite 3.4) y propensas a retener solución propiciando así una condición saturada y en consecuencia, la generación de cargas de presión de poros. Por ello la pila de estudio se riega a una tasa de 5 L/h/m². Por lo tanto, la K_{SAT} mínima permitida es la correspondiente a una de diseño estándar asociada a dicha tasa, es decir, 1,39x10⁻³ cm/s (ver Tabla 3.1). Se considera este valor de K_{SAT} como la permeabilidad mínima permitida para este caso de estudio.

La Tabla 4.1 muestra la tasa de riego adoptada, los valores K_{SAT} y sus respectivos valores I_c asociados; además, en la Figura 4.1 se presenta la correlación propuesta por Robertson (2010a).

Tabla 4.1
Equivalencia entre K_{SAT} (cm/s) e I_c

Tasa de riego L/h/m ²	Permeabilidad		I _c	Descripción
	K _{SAT} (cm/s)	K _{SAT} (m/s)		
5	1,39x10 ⁻⁰³	1,39x10 ⁻⁰⁵	1,91	Permeabilidad mínima permitida
10	2,78x10 ⁻⁰³	2,78x10 ⁻⁰⁵	1,81	Permeabilidad estándar
	2,78x10 ⁻⁰⁴	2,78x10 ⁻⁰⁶	2,14	Permeabilidad teórica

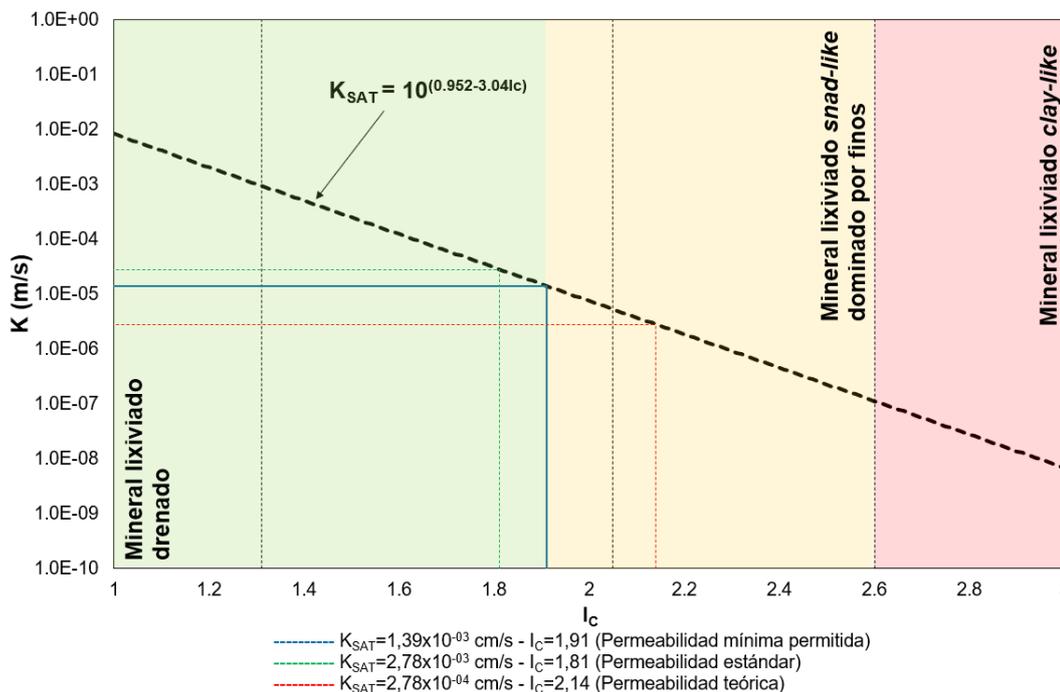


Figura 4.1 Valores K_{SAT} (cm/s) e I_c en mineral lixiviado.

En pilas de lixiviación, la degradación del mineral inducida por la solución produce un aumento del contenido de finos del mineral lixiviado y, por lo tanto, puede

causar una transición de condiciones drenadas a no drenadas en su comportamiento mecánico junto con una disminución en su permeabilidad global. Esto es particular de cada pila y su extensión debe ser verificada periódicamente.

4.2.2 Velocidad de ondas de corte (V_s)

La evaluación del potencial de licuación requiere del perfil de relación de esfuerzos cíclicos (CSR) que, para la presente investigación, se obtendrá a partir de la aceleración en superficie calculada mediante un análisis de respuesta sísmica 1D (ARS 1D) de acuerdo con lo estipulado en las condiciones del método simplificado. Para caracterizar la rigidez de las capas que conforman las columnas de análisis del ARS 1D, se requiere de las V_s , las que en este caso fueron medidas durante la ejecución de los SCPTu a través de un geófono sísmico instalado en la manga del piezocono que capta las ondas provenientes del golpe de una comba sobre una placa en superficie. La Tabla 3.3 resume estos registros.

Las V_s obtenidas de los SCPTu se registraron en intervalos, en su mayoría, de 1 m. Debido a la aleatoriedad en la rigidez y estado de cada una de las capas auscultadas se tomó el perfil medido de V_s como base para ajustar estas mediciones a una función no lineal (*i.e.* $A=Bx^n$) donde la V_s aumenta con la profundidad, a fin de emplearla en el ARS 1D. La Figura 4.2 muestra los registros de V_s recopilados y sus respectivas curvas de ajuste.

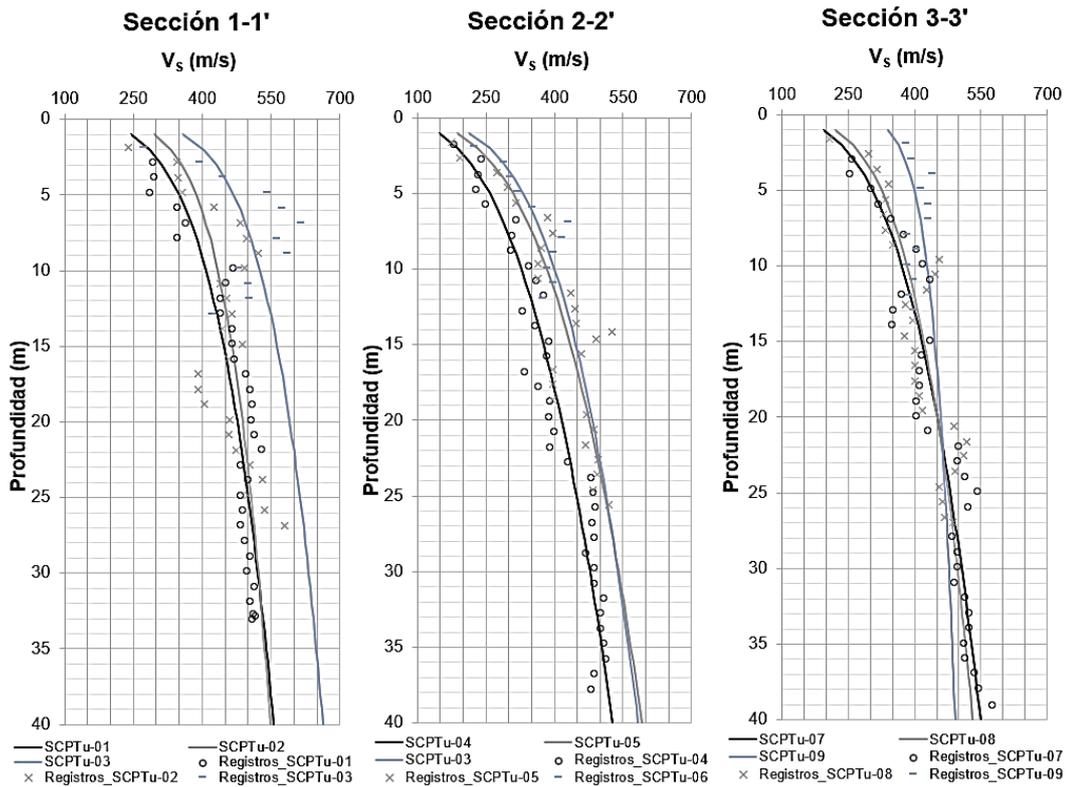


Figura 4.2 Registros V_s (m/s) registradas en la pila de lixiviación evaluada.

La Tabla 4.2 presenta los parámetros de las funciones no lineales calculadas para representar el incremento de la V_s con el nivel de esfuerzo o profundidad.

Tabla 4.2
Ajuste no lineal ($A=Bx^n$) para los registros de V_s (m/s)

Sección	Sondaje	V_s (m/s)	Parámetros	
			A	n
1-1'	SCPTu-01	[292 - 529]	244,9	0,22
	SCPTu-02	[239 - 580]	295,6	0,17
	SCPTu-03	[272 - 615]	358,8	0,17
2-2'	SCPTu-04	[179 - 513]	148,3	0,34
	SCPTu-05	[174 - 527]	186,5	0,31
	SCPTu-06	[223 - 429]	213,5	0,27
3-3'	SCPTu-07	[253 - 575]	194,0	0,28
	SCPTu-08	[208 - 519]	222,0	0,24
	SCPTu-09	[379 - 439]	340,0	0,10

4.2.3 Sismicidad

4.2.3.1 Espectro de peligro uniforme y aceleración máxima del terreno (PGA)

La presente investigación toma en cuenta un estudio de peligro sísmico proporcionado con fines de investigación por la empresa Anddes Asociados SAC, y que fue elaborado en el 2022 para el sitio. Del estudio de peligro sísmico proporcionado se adoptaron los espectros de aceleraciones para periodos de retorno (T_R) de 95, 190, 475, 975 y 2 475 años para los sismos de diseño (DBE, por sus siglas en inglés) y máximo creíble (MCE, por sus siglas en inglés). El sitio de la pila evaluada es uno de clase B, con V_{S30} característica de 760 m/s determinada a partir de un estudio geofísico realizado en la cimentación de la pila. Todos los espectros generados corresponden a demandas de amenaza para el caso elástico para la componente horizontal del movimiento para un amortiguamiento crítico del 5%.

Por otro lado, debido al nivel de riesgo que pueda representar una estructura geotécnica debido a la ocurrencia de licuación, como la pila de lixiviación abordada en el presente estudio, se podría adoptar una probabilidad de excedencia de 10% y un tiempo de servicio de 50 años, donde ambos parámetros resultan en un periodo de retorno (T_R) de 475 años para una clase de sitio B; por lo tanto, para el presente estudio, se ha adoptado el espectro de diseño asociado este periodo de retorno. Además, el espectro de $T_R = 475$ años será utilizado en el análisis de respuesta sísmica.

La Tabla 4.3 muestra los parámetros asociados a un $T_R = 475$ años y la PGA del espectro de diseño. Además, la Figura 4.3 muestra el espectro probabilístico del estudio de peligro sísmico asociado al mismo periodo de retorno.

Tabla 4.3
Resumen de valores PGA - Análisis probabilísticos

Clase de sitio	Parámetros	Periodo de retorno (T_R) en años
		475
B ($V_s=760$ m/s)	P_{exc} (%)	10
	T.S. (años)	50
	PGA (g)	0,918

Abreviaturas:

V_s : Velocidad de onda de corte P_{exc} : Probabilidad de excedencia T.S.: Tiempo de servicio
 PGA: Peak ground acceleration T_r : Periodo de retorno

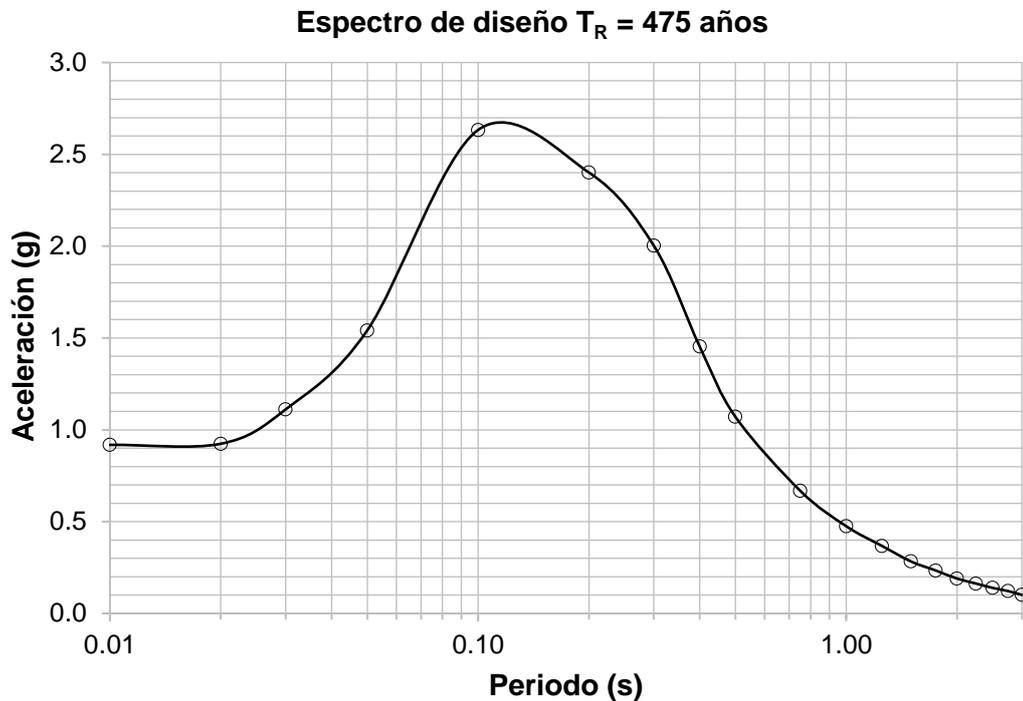


Figura 4.3 Espectros de diseño - Sitio de clase B

4.2.3.2 Magnitud momento del terremoto de diseño (M_w)

La magnitud momento, M_w , escala de magnitud propuesta por Hanks y Kanamori (1979), es actualmente la más utilizada en ingeniería geotécnica sísmica debido a que no se satura en un sismo de gran magnitud (como los ocurrientes entre las placas de Nazca y la Sudamericana, de tipo subducción) y además se basa en el momento sísmico que cuantifica la energía liberada durante un terremoto. Para el presente estudio, la M_w caracteriza la duración del terremoto que ocurriría en la pila, no así en las fuentes sismogénicas empleadas en el estudio de peligro sísmico. Por otro lado, según la desagregación sísmica realizada en el estudio de peligro sísmico, la M_w que más contribuye a la curva de amenaza para un $T_R = 475$ años es de 7,5. Por lo tanto, para la presente investigación, la M_w es de 7,5.

4.3 ANÁLISIS NO LINEAL UNIDIMENSIONAL DE RESPUESTA SÍSMICA

Se realizaron análisis no lineal unidimensional de respuesta sísmica (ARS 1D) en la pila de lixiviación a fin de estimar, en cada perfil auscultado por SCPTu, los perfiles de esfuerzos cíclicos (CSR) asociados a un evento de $T_R = 475$ años, y

así poder considerar dichos perfiles dentro de la evaluación del potencial de licuación.

Para el desarrollo del ARS 1D se empleó el programa de cómputo DeepSoil v6.1.7.0 (Hashash *et al.*, 2016), que realiza el análisis de no lineal en el dominio del tiempo; asimismo, captura el comportamiento del suelo a pequeñas, intermedias y grandes deformaciones a través de una función cuadrática denominada como el modelo cuadrático/hiperbólico o modelo GQ/H (Groholski *et al.*, 2016).

El ARS 1D se realizó mediante el siguiente procedimiento:

- Selección registros tiempo-historia de aceleraciones base.
- Procedimiento de ajuste espectral.
- Definición de arreglos 1D y perfiles V_s asociados a ellos.
- Caracterización dinámica de cada una de las capas que conforman dichas columnas de suelo empleando curvas de degradación del módulo de corte y de relación de amortiguamiento versus deformación cortante cíclica.
- Ejecución de los ARS 1D por medio del programa DeepSoil.

En las secciones subsiguientes se describe la selección de registros sísmicos base, procedimiento de ajuste espectral, definición de columnas unidimensionales y caracterización dinámica de las columnas.

4.3.1 Registros tiempo-historia de aceleración base

Estos fueron seleccionados y ajustados al espectro de diseño de $T_R = 475$ años, que fue reportado en el subcapítulo 4.2.3, a fin de emplearlos en el ARS 1D.

Se seleccionaron 06 registros tiempo-historia de aceleraciones que cumplan con las recomendaciones de Bommer y Acevedo (2004) y Abrahamson (2011), que sugieren que al seleccionar registros tiempo-historia de aceleración, los parámetros clave del sismo que afectarán el carácter no estacionario de la forma de onda son la magnitud, distancia, y dirección (para sitios ubicados cerca de fallas grandes). Para la magnitud del terremoto, los registros deben estar dentro de 0,5 unidades de magnitud del terremoto de diseño seleccionado, siendo la magnitud asociada al espectro de diseño de $M_{7,5}$ y la de los registros seleccionados de

M7,8 (ver Tabla 4.4). La Tabla 4.4 resume los principales parámetros sismológicos de los registros sísmicos adoptados.

Tabla 4.4
Parámetros principales de los registros tiempo-historia sísmicos bases ajustados espectralmente al $T_R = 475$ años para clase de sitio B

Sismo	Estación	Latitud	Longitud	Fecha	Mecanismo	M_w	PGA (g)	
Ancash	Parque de la reserva	-9,27	-78,84	31-05-70	Subducción de intraplaca	7,8	EW	0,669
							NS	0,798
Tarapacá	Iquique Hospital	-20,03	-69,28	13-06-05	Subducción de intraplaca	7,8	EW	0,532
							NS	0,668
Tarapacá	Pica	-20,03	-69,28	13-06-05	Subducción de intraplaca	7,8	EW	0,667
							NS	0,801

4.3.2 Ajuste espectral para la generación de registros sintéticos

Dado que el sitio de la pila no cuenta con registros sísmicos de eventos equivalentes a uno de periodo de retorno cercano o igual a 475 años, se deberá generar una serie de registros sintéticos obtenidos a partir de sismos registrados mediante acelerómetros a fin de escalar sus espectros de respuesta a la del estudio de peligro sísmico tomando en cuenta una serie de consideraciones que se detallan a continuación.

El proceso de ajuste espectral consiste en modificar los registros tiempo-historia de aceleraciones base hasta que el espectro de respuesta resultante coincida estrechamente con un espectro de respuesta objetivo. El objetivo del ajuste espectral es reducir las crestas y valles individuales del movimiento sísmico inicial, al tiempo de preservar las características no estacionarias del movimiento sísmico base (Abrahamson, 1992). El procedimiento de ajuste espectral puede ser realizado en el dominio del tiempo o de las frecuencias, siguiendo la metodología en el dominio del tiempo propuesto por Al Atik y Abrahamson (2010).

En el dominio del tiempo, el procedimiento consiste en añadir ondículas (Hancock *et al.*, 2006) para mejorar las deficiencias espectrales del movimiento sísmico base, haciendo que la ondícula introduzca menos energía en el registro de aceleraciones y así preservar las características no estacionarias del registro de aceleraciones inicial. El ajuste espectral se realizó mediante el software

SeismoMatch 2018, que emplea el método presentado por Al Atik y Abrahamson (2010).

Los resultados del ajuste espectral de los registros tiempo-historia de aceleraciones indican lo siguiente:

- El suelo de la cimentación de la pila ha sido considerado como un sitio de clase B según la ASCE 7-22.
- Los espectros de respuesta de los registros tiempo-historia base coinciden con el espectro objetivo ($T_R = 475$ años). Además, el promedio de los espectros de los registros tiempo-historia de aceleraciones ajustados espectralmente se encuentra dentro de un $\pm 10\%$ del espectro objetivo.
- Los espectros de amplitudes de Fourier no han sufrido cambios significativos respecto a los registros iniciales, principalmente en frecuencias entre 1 Hz hasta 25 Hz.
- La intensidad de Arias de los registros tiempo-historia ajustados espectralmente mantienen similitud con los registros iniciales, permitiendo asegurar que la liberación de energía del registro sintético se logre de forma similar al registro base.

En la Figura 4.4 se presenta los espectros de aceleraciones de los registros base (ver Tabla 4.4) ajustados al espectro de diseño de $T_R = 475$ años del estudio de peligro sísmico.

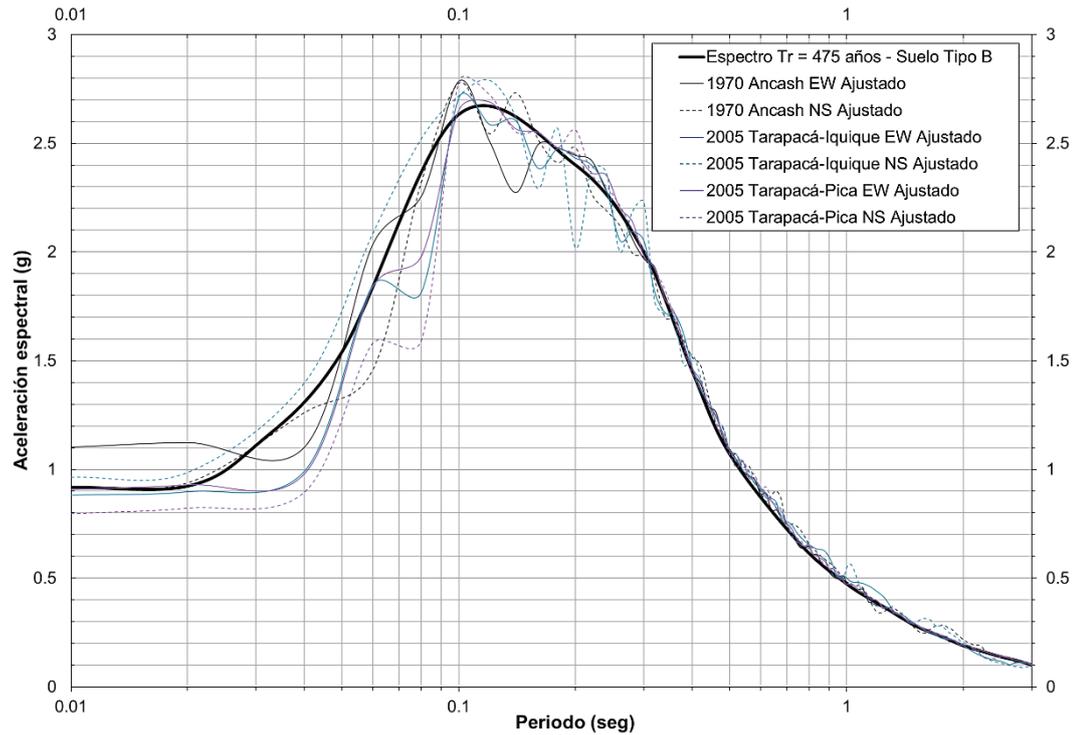


Figura 4.4 Espectros de aceleraciones ajustados al espectro de un periodo de retorno $T_R = 475$ años

4.3.3 Propiedades dinámicas

Las propiedades dinámicas involucradas en el ARS 1D corresponden al módulo de corte y a la relación de amortiguamiento, que son representados por curvas no lineales de reducción e incremento respectivamente. Las curvas de reducción del módulo de corte y del incremento de la relación de amortiguamiento, consideradas en el análisis de respuesta sísmica se muestran en la Figura 4.5. Para el modelo geotécnico propuesto, el mineral lixiviado se caracterizó mediante la familia de curvas desarrollada por Darendeli (2001).

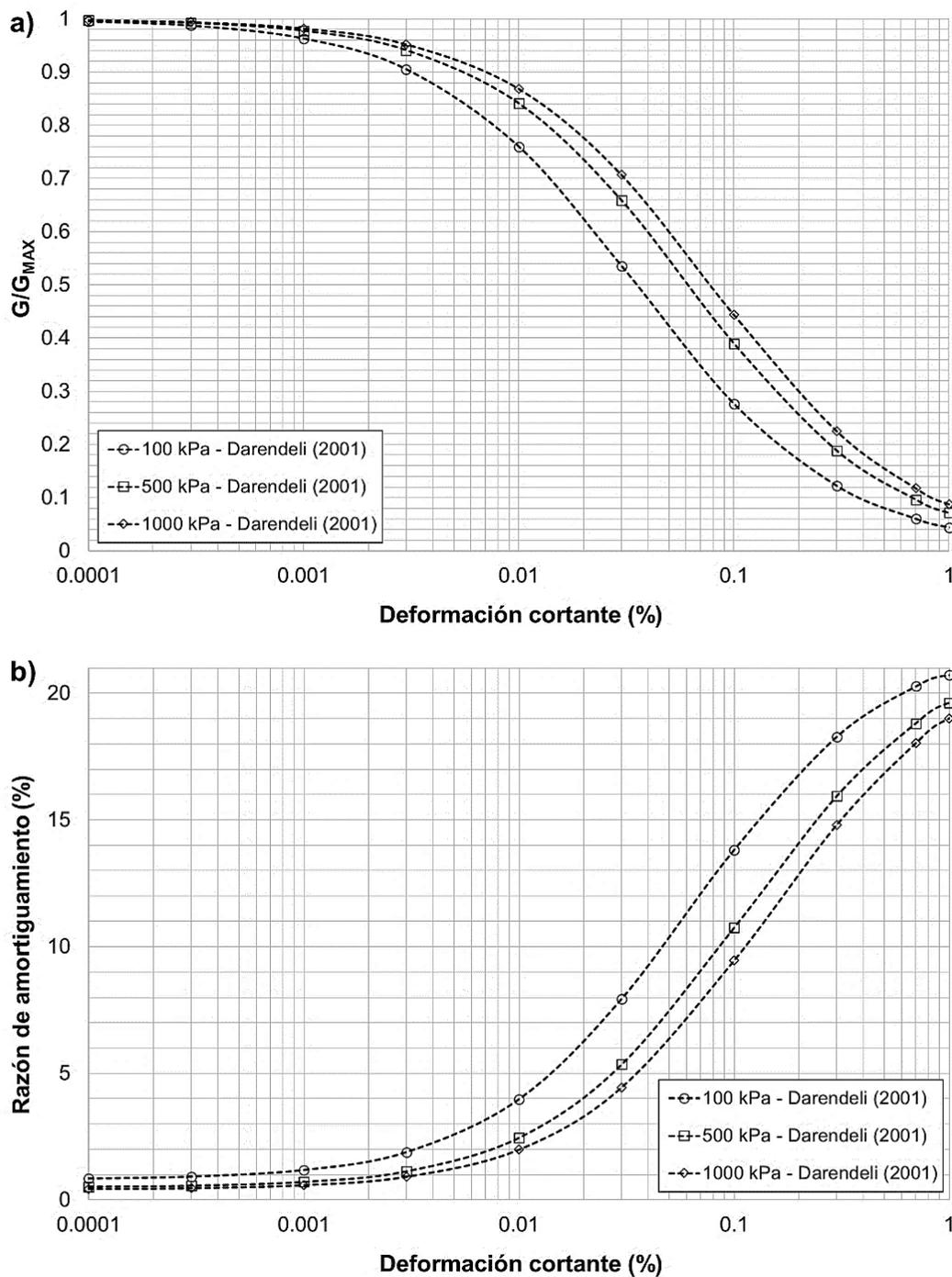


Figura 4.5 Propiedades dinámicas del mineral. **(a)** Curvas de reducción del módulo de corte. **(b)** Curvas de razón de amortiguamiento. Fuente: Darendeli (2001).

De acuerdo con los SCPTu, el mineral lixiviado presenta un comportamiento mayoritariamente del tipo *sand-like* y existen sectores *clay-like*; sin embargo, las curvas propuestas por Darendeli (2001) son formuladas a partir de las características físicas del suelo y no de su comportamiento, por lo que parámetros

de entrada como la relación de sobreconsolidación (OCR) y plasticidad (IP) serán asumidas en la presente investigación a partir de lo expuesto en los acápite 3.2.1 y 3.5.1. La historia de esfuerzos no se conoce en la pila, sin embargo, se ha adoptado un valor de OCR igual a 1 para las curvas propuestas por Darendeli (2001). Otro de los parámetros del modelo de adoptado es el índice de plasticidad (IP) y para ello se ha asumido un valor nulo de plasticidad que se vincula al hecho de que un mineral de matriz dominada por finos o transicional de baja o nula plasticidad es más susceptible a licuar a diferencia de un suelo fino que presenta cierta plasticidad (ver Figura 3.1), lo que es coherente con los hallazgos y recomendaciones de Seed *et al.* (2003), Bray y Sancio (2006), Idriss y Boulanger (2006) y Armstrong y Malvick (2016).

La Tabla 4.5 muestra la caracterización dinámica adoptada para el mineral lixiviado en el ARS 1D.

Tabla 4.5
Resumen de parámetros dinámicos de los materiales

Material	Profundidad de la columna	V _s (m/s)	Curvas de degradación de módulo y razón de amortiguamiento
Mineral	Varía con la profundidad del SCPT _u	Según lo expuesto en el acápite 4.2.2	Darendeli (2001) OCR=1, IP=0 (ver Figura 4.5)
Basamento rocoso	---	1500	Medio elástico

4.3.4 Metodología de análisis

Las columnas de análisis para el ARS 1D serán modeladas como un suelo estratificado, amortiguado y forzado (la fuerza corresponde al sismo de entrada) sobre roca elástica; en donde la onda sísmica es transmitida desde la base capa a capa donde una porción es reflejada y otra transmitida según las propiedades de la capa o estrato que interviene en el modelo, obteniendo una amplificación o atenuación de la señal sísmica de entrada. Se empleó el *software* DeepSoil v6.1.7.0 (Hashash *et al.*, 2016).

Por otro lado, el ARS será del tipo no lineal con dominio en el tiempo siguiendo el modelo cuadrático/hiperbólico o GQ/H (Groholski *et al.*, 2016) que sigue las trayectorias de los lazos de histéresis (τ vs γ) según las condiciones de carga,

descarga y recarga dentro de un rango de deformaciones cortantes que llega hasta 10%.

4.3.5 Condiciones de análisis

Para los ARS 1D desarrollados, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se ha desarrollado los ARS 1D en términos de esfuerzos totales sin generación de exceso de presión de poros, dada la practicidad en los cálculos y al hecho de que la respuesta sísmica en esfuerzos efectivos es equivalente o similar a la respuesta en esfuerzos totales antes de alcanzar el desencadenamiento de la licuación.
- Se evaluaron arreglos unidimensionales representativos de los SCPTu ejecutados en la pila, considerando que representa la altura desde el basamento rocoso hasta la superficie dada la cercanía entre la máxima profundidad del sondaje con el revestimiento basamento rocoso-geomembrana.
- Los modelos geotécnicos han sido construidos a partir del tipo de comportamiento del mineral capturado por los SCPTu (ver acápite 3.4); sin embargo, la curva de las propiedades dinámicas para la ejecución del ARS 1D se encuentran ligadas a las propiedades físicas del material a evaluar, por lo que, tomando en cuenta la ausencia de ensayos de propiedades físicas para cada capa *sand-like* y *clay-like* identificados, se ha adoptado conservadoramente en todas las columnas de análisis una plasticidad nula ($IP=0$) en el mineral lixiviado considerando la familia de curvas propuestas por Darendeli (2001).
- Se ha considerado para el mineral lixiviado un peso específico total de 19 kN/m^3 . Por otro lado, el basamento rocoso es adoptado como una base elástica con un peso específico de 24 kN/m^3 , velocidad de ondas de corte característica de 1500 m/s y una relación de amortiguamiento de 5%.
- Se ha considerado el incremento de forma gradual de las V_s según lo descrito en el acápite 4.2.2 en las capas de mineral lixiviado a fin de que, tomando en cuenta que la densidad es la misma en cada capa, la

impedancia sea ~ 1 , representación a una condición de contorno continuo y evitando así errores en los cálculos del ARS 1D.

- Los arreglos 1D (columnas) fueron caracterizados empleando las curvas propuestas por Darendeli (2001) ya que estas representarían mejor las propiedades dinámicas del mineral lixiviado; por otro lado, las V_s fueron obtenidas a partir de los ensayos geofísicos ejecutados durante el desarrollo de los SCPTu.
- Se seleccionaron seis (06) registros tiempo-historia de aceleraciones correspondientes a las componentes E-W y N-S de los sismos de Ancash (1970) y Tarapacá (2005) (registrado en 02 estaciones diferentes, ver Tabla 4.4) y que son concordantes con las recomendaciones de Bommer y Acevedo (2004) y el escenario sísmico que define el espectro de aceleraciones objetivo. Dichos registros fueron ajustados espectralmente al espectro de 475 años para un sitio de clase B. Se considera que, en el análisis de respuesta, se están manteniendo las características no estacionarias de los registros tiempo historia.
- Los materiales que componen las columnas fueron discretizados de tal manera que permitan la transmisión de ondas con un mínimo de 25 Hz de frecuencia hasta un máximo de 50 Hz.
- Se usó el modelo GQ/H (Groholski *et al.*, 2016) que permite representar el comportamiento del suelo a pequeñas, medianas (menores a 0,10% de deformación cortante) y grandes deformaciones (mayores a 0,10% de deformación cortante).
- Para el desarrollo del modelo GQ/H, se ha definido inicialmente el esfuerzo cortante máximo en cada capa a fin de evitar obtener resultados inverosímiles.

4.3.6 Resultados obtenidos

Al realizar análisis de respuesta sísmica unidimensional se puede obtener una serie de resultados como PGA, espectro de respuestas, trayectorias de los lazos de histéresis (τ vs γ), esfuerzos cíclicos máximos, entre otros. A fin de obtener los perfiles CSR, se presentarán como resultados los esfuerzos cíclicos máximos del análisis de respuesta factorado por 0,65 (que representa la relación entre el

esfuerzo cíclico promedio y el máximo). En la Figura 4.6 se observa los perfiles CSR obtenidos para cada sondaje SCPTu.

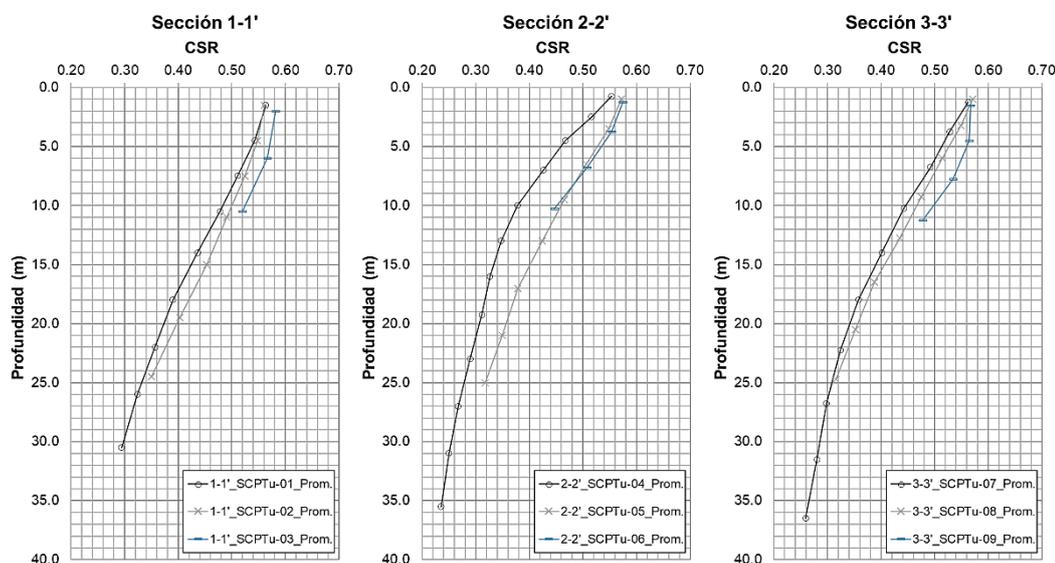


Figura 4.6 Relación de esfuerzos cíclicos en los sondajes SCPTu.

Las curvas $CSR_{0,65}$ presentadas en la Figura 4.6 no serán utilizadas directamente a la evaluación del potencial de licuación debido a que el resultado proviene de un método de análisis que difiere a la metodología simplificada como la de Youd *et al.* (2001), requiriéndose un ajuste. Landa (2022) dio cuenta de lo mencionado anteriormente y presenta las siguientes condiciones para el cálculo de la curva CSR para evaluar el potencial de licuación:

- Los criterios y la metodología propuesta por diversos autores para la propuesta de curvas *triggering* de licuación es desconocida. Se infiere que emplearon el método lineal equivalente (e.g. actualmente en un ARS 1D se emplea el método no lineal, que anteriormente no era factible por la capacidad computacional).
- Tomar directamente las curvas CSR de un ARS 1D induce incertidumbre dado que se comparan los CSR estimados mediante curvas dinámicas distintas, y métodos de resolución diferentes a los empleados para fijar el patrón de comparación de CRR de acuerdo con el criterio fijado por el autor del método referenciado.

- Landa (2022) recomienda obtener la curva CSR según las consideraciones y suposiciones del método simplificado escogido para la evaluación del potencial de licuación a través de los siguientes pasos:
 - Empleo del factor de reducción (r_d) a través de la formulación propuesta por el método escogido.
 - Obtener los esfuerzos cíclicos a través de la formulación propuesta por Idriss (1971) que es la siguiente:

$$CSR_{0,65} = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \left[\frac{a_{max}}{g} \right] \left[\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right] r_d$$

- El término 0,65 representa la relación entre el esfuerzo cíclico promedio y el máximo.
- Obtener la aceleración máxima en superficie mediante los ARS 1D y tomar como referencia la curva factorada $CSR_{0,65}$.
- Se ajusta el PGA, que es el parámetro empleado en el método simplificado para generar el perfil CSR mediante fórmula, hasta que la curva estimada por formulación se ajuste a la $CSR_{0,65}$ estimada por ARS 1D, como se muestra en la Figura 4.6. Las curvas obtenidas en este punto se muestran en las Figuras 4.7 a la 4.9 (curvas punteadas de rojo) y serán utilizadas para la evaluación del potencial de licuación.

Obtener curvas CSR según las condiciones propuestas por el método simplificado Youd *et al.* (2001) ajustándolas a los esfuerzos cíclicos obtenidos por medio de análisis de respuesta sísmica no lineal 1D según lo indicado anteriormente, ha permitido conservar las consideraciones o asunciones adoptadas en el método simplificado ajustando los resultados del análisis de respuesta. En las Figuras 4.7 a la 4.9 se ha observado algunas diferencias entre $0,65CSR_{máx}$ y $CSR f(r_d)$ -PGA sin embargo se ha logrado el ajuste a fin de no presentar algún inconveniente en su aplicación en la evaluación del potencial de licuación a desarrollarse en el próximo acápite.

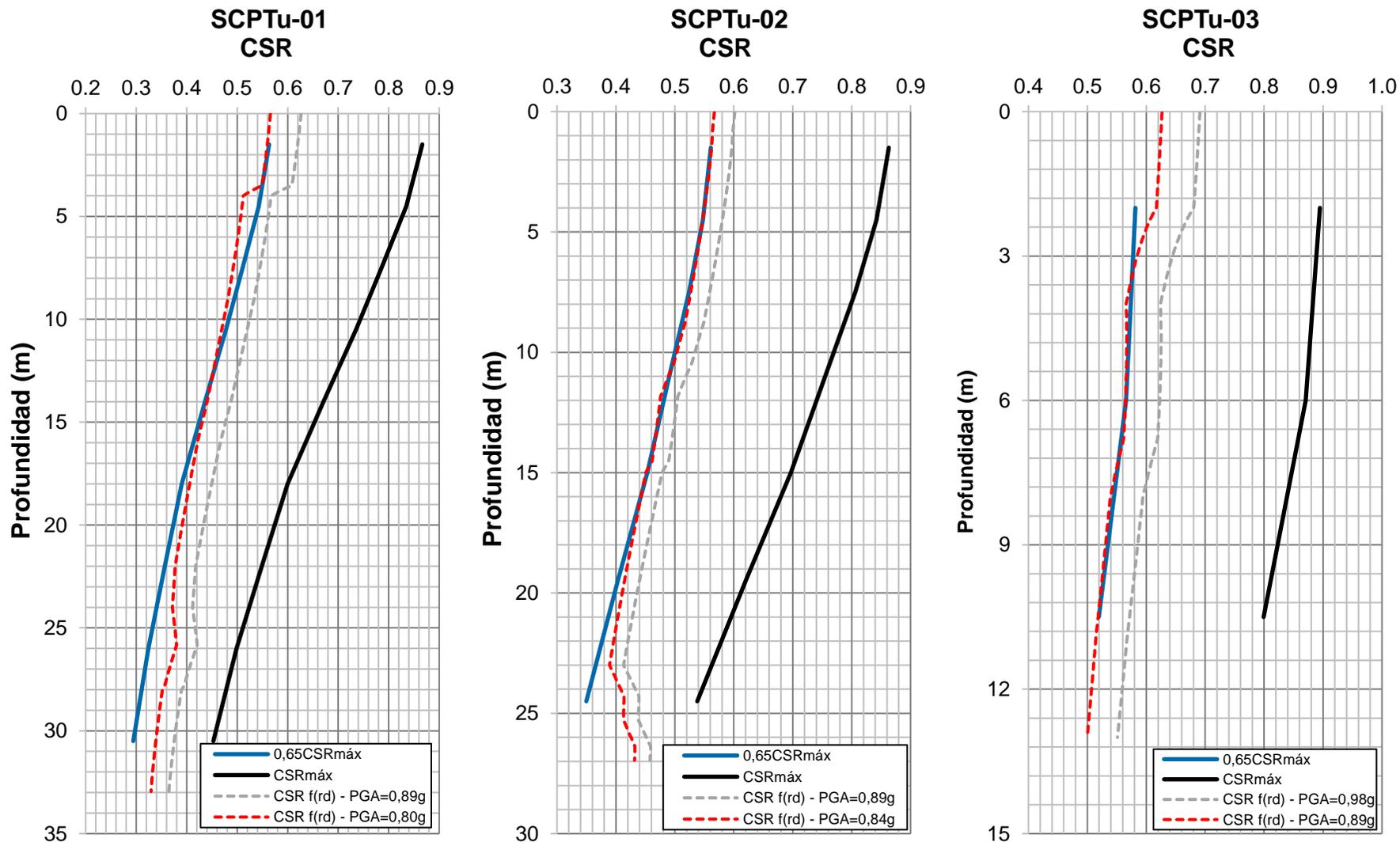


Figura 4.7 Curvas $CSR_{0,65}$ - $T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método simplificado - Sección 1-1'.

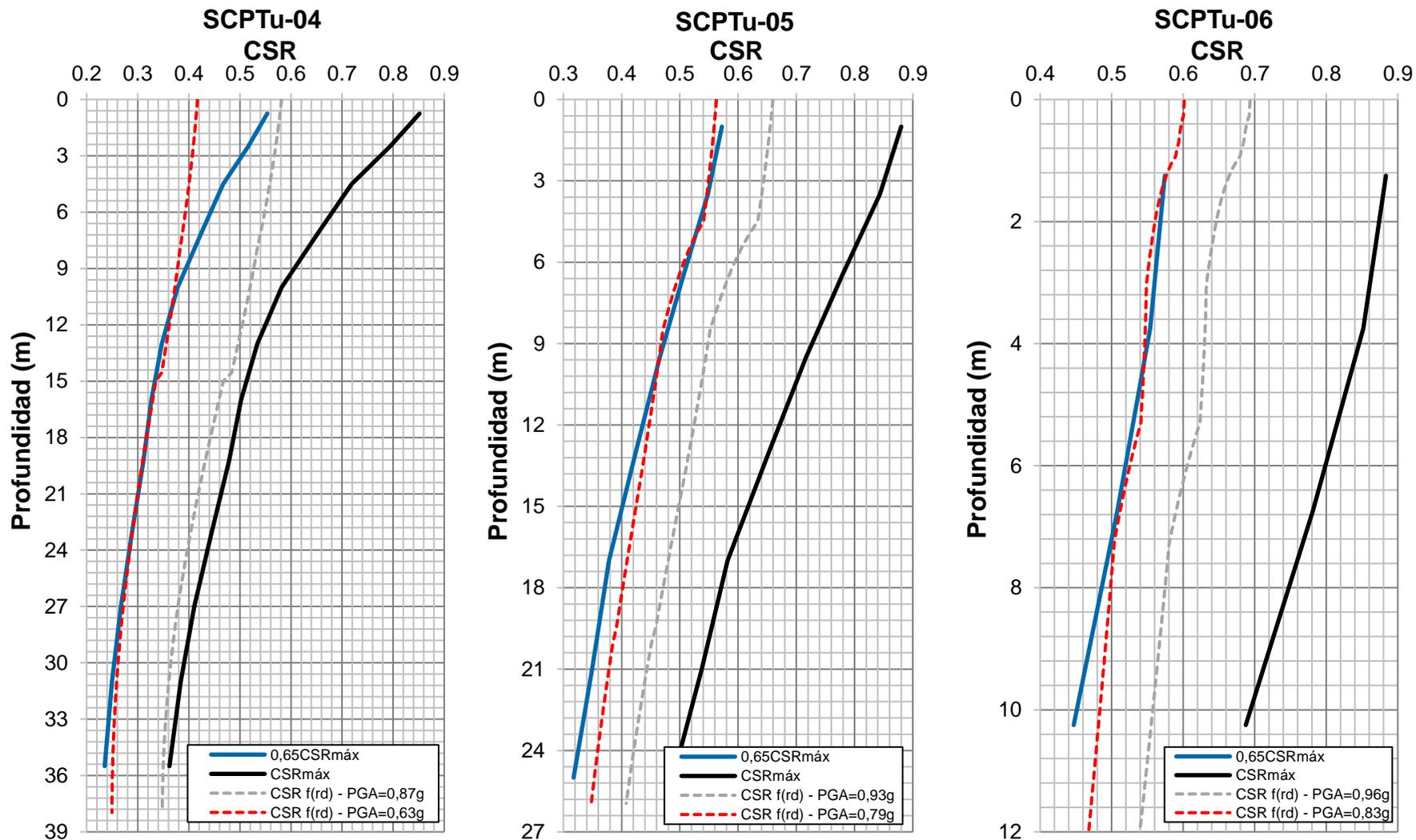


Figura 4.8 Curvas $CSR_{0,65} - T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método simplificado - Sección 2-2'.

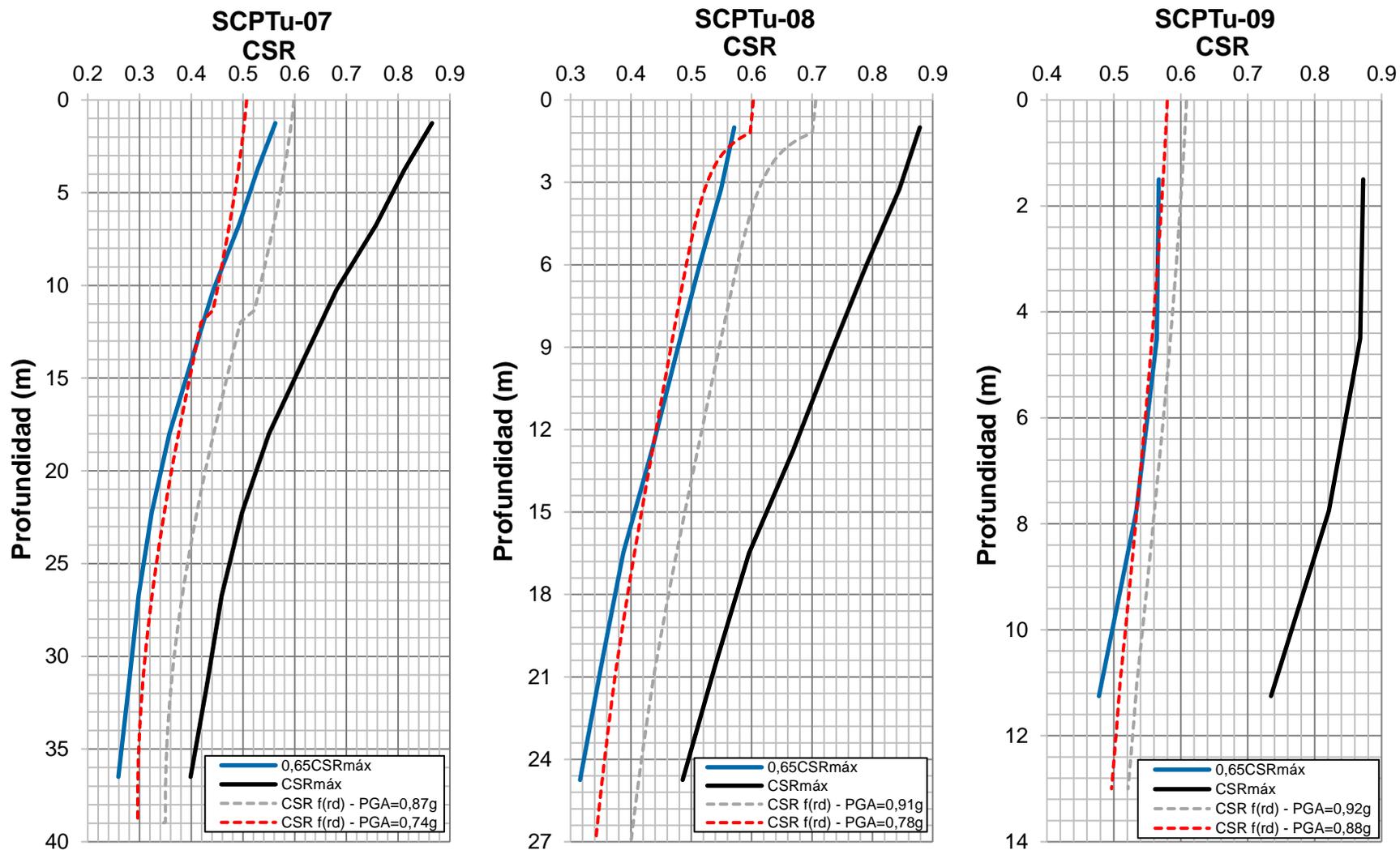


Figura 4.9 Curvas $CSR_{0,65} - T_R = 475$ años en función del r_d para su uso en el método simplificado - Sección 3-3'.

4.4 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

4.4.1 Introducción

El análisis de licuación de una pila de lixiviación se lleva a cabo generalmente bajo los estándares del estado de la práctica que consiste en hacer uso del método simplificado propuesto por Seed e Idriss (1971) o Youd *et al.* (2001) donde dichas metodologías suponen un nivel freático estable que es una condición difícil de alcanzar en una pila. De hecho, el diseño de una pila debe evitar la formación de un nivel freático y zonas de saturación en favor de la percolación de solución y de la recuperación de la solución lixivante, dificultando el uso de un método simplificado ya que este requiere de un nivel de agua a cierta profundidad a fin de generar una carga de presión de poros que aumenta linealmente con la profundidad generando para una pila de lixiviación condiciones irreales dado que esta estructura presentaría como condición desfavorable zonas saturadas con cargas de presión que no aumenta con la profundidad sino que variará según la permeabilidad del mineral lixiviado. Por otro lado, la degradación por ácido del mineral lixiviado, que genera el incremento de partículas más finas, puede causar una transición en su comportamiento mecánico (de condiciones drenadas a no drenadas) y una disminución en su permeabilidad global.

En el caso particular de la pila evaluada, no se han tenido registros importantes de cargas de presión de acuerdo con los sondajes SCPTu realizados, no obstante, se estima que el mineral tendría valores de conductividad hidráulica por debajo del mínimo permisible en un diseño convencional de pilas, *i.e.* $K_{SAT} = 2,78 \times 10^{-03}$ cm/s, valor que corresponde a un orden de magnitud mayor (10 veces mayor) que la conductividad hidráulica teórica que equivale a una tasa de riego de 10 L/h/m². Dado que el mineral debe presentar una alta conductividad hidráulica para recuperar solución en condiciones normales de operación, dicha condición, la de saturación completa, es lograda en el mineral que presenta un I_C mayor a 1,91. La relación aproximada entre el I_C y la K_{SAT} es la presentada en la Figura 4.1.

Por lo tanto, la presente investigación propone la identificación de capas de mineral que son capaces de retener solución, *i.e.* que cumplan con las condiciones de saturación y presentan una carga de presión inicial, evaluando el índice de comportamiento de suelo (I_C) como un indicador de la permeabilidad del mineral, teniendo como referencia principal que es muy común en la industria emplear un

valor de $I_c = 2,60$ como la frontera que diferencia el comportamiento de los suelos del tipo *sand-like* y *clay-like*. Y a su vez, definir aquellas zonas de mineral que son contractivas y presentan una relación CRR/CSR menor a 1. Cumpliendo estos tres criterios, se obtuvieron las capas licuables.

4.4.2 Metodología de análisis propuesta

En el caso de particular de una pila de lixiviación en donde no se tiene clara la distribución de cargas de presión de poro, se propone tres criterios del comportamiento del mineral que determinarán la posibilidad de ocurrencia de licuación por flujo como se indica a continuación:

- Evaluar el potencial de licuación estimando el estado *in situ* del mineral a través del parámetro de estado (ψ), el índice normalizado de comportamiento de suelo (I_c) y la curva de relación de resistencia y esfuerzo cíclico (CRR y CSR, respectivamente).
- Condición 1: Identificar los tramos en profundidad donde el mineral podría retener solución.
- Condición 2: Identificar los tramos en profundidad donde las capas de mineral se encuentren en estado contractivo y mayor probabilidad de presentar un comportamiento *strain-softening*.
- Condición 3: Estimar la curva de relación de esfuerzos cíclicos (CSR) e identificar las capas de mineral donde sea mayor o igual a la curva de relación de resistencias cíclicas (CRR).
- Las zonas potencialmente licuables deberán cumplir con las tres condiciones a la vez.

Los perfiles de parámetro de estado fueron determinados en el acápite 3.5.6.3 donde se observan las capas de $\psi > -0,08$. Además, las fronteras del mineral que pueda retener solución se encuentran descritas en el acápite 4.2.1 donde el valor de $I_c > 1,91$ será el característico de un mineral que pueda desarrollar una condición no drenada. Por otro lado, los perfiles CSR fueron obtenidos mediante el análisis de respuesta sísmica no lineal presentada en el acápite 4.3.

4.4.2.1 Relación de resistencia cíclica (CRR)

Los perfiles de CRR se estimaron a partir de los registros de los sondajes SCPTu siguiendo el método propuesto por Robertson (2009b, 2010c), que incluye dentro de sus formulaciones materiales con comportamiento *clay-like*. El método fue originalmente propuesto por Robertson y Wride (1998) y ha ido desarrollándose en el tiempo hasta lograr la formulación propuesta por Robertson (2009b, 2010c). Las siguientes ecuaciones presentan la correlación basada en el SCPTu para el cálculo de la CRR para una magnitud $M_W = 7,5$ y normalizada a $\sigma'_{v0} = 1$ atm.

$$CRR_{7,5} = 93 \left[\frac{Q_{tn,cs}}{1000} \right]^3 + 0,08; \text{ para } I_C < 2,70 \text{ y } 50 \leq Q_{tn,cs} \leq 160$$

$$CRR_{7,5} = 0,053 Q_{tn} K_\alpha; \text{ para } I_C \geq 2,70$$

El cálculo de parámetros como I_C , Q_{tn} y $Q_{tn,cs}$ ya fueron abordados en el capítulo III. El $Q_{tn,cs}$ se ha calculado a través de la actualización presentada en Robertson (2021), principalmente en la formulación para obtener el K_C ($Q_{tn,cs} = K_C Q_{tn}$). Además, se ha adoptado un $K_\alpha = 1,0$. A continuación, en la Figura 4.10 se presentan los valores CRR obtenidos mediante la metodología adoptada.

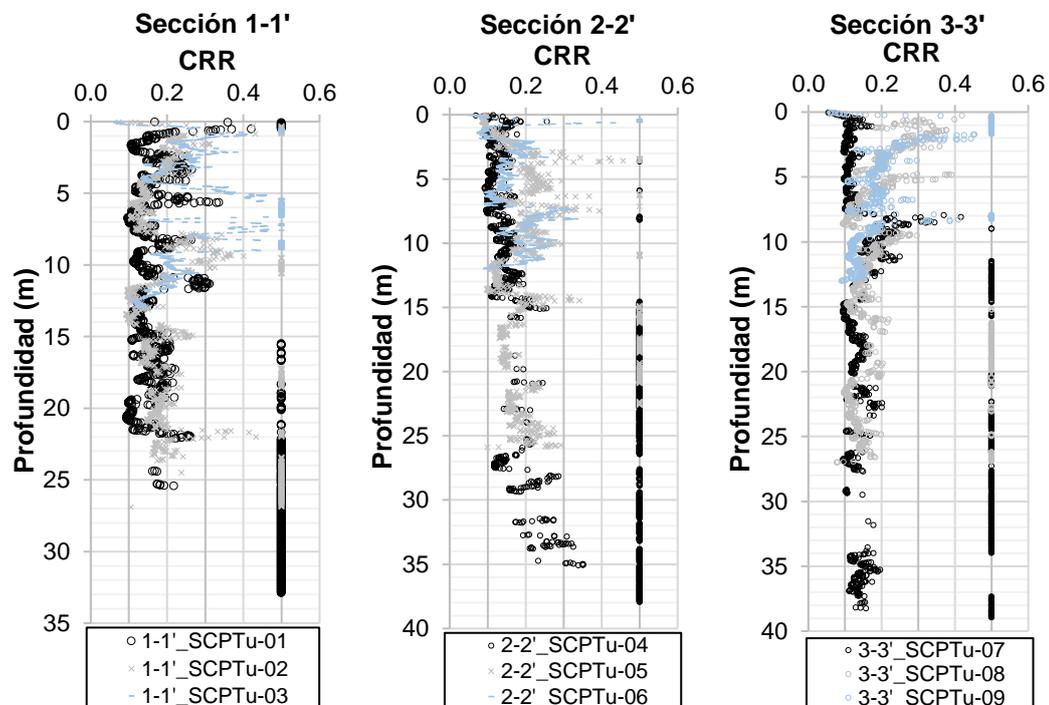


Figura 4.10 CRR del mineral lixiviado a partir de los sondajes SCPTu.

Dado que la base de datos históricos que presentan Robertson y otros autores para la curva de desencadenamiento de la licuación ($CRR_{7,5} = CSR_{7,5}$), incluye valores de la CRR hasta de 0,5, se ha adoptado este valor como uno máximo a fin de no sobrestimar el cálculo de la CRR en cada una de las capas auscultadas. En la Figura 4.10 se observa que, dentro de los primeros metros ($\sim < 15$ m) se obtuvieron valores de $CRR = 0,5$ dado a que existen tramos de mineral *sand-like* con $Q_{tn,cs} > 160$ mientras que a profundidad se obtiene los mismos valores para mineral *clay-like* con $Q_{tn,cs} > 10$.

4.4.3 Condiciones de análisis

Se tomó en cuenta para la evaluación del potencial de licuación en el mineral lixiviado las siguientes condiciones:

- Se evaluaron 09 columnas de mineral lixiviado, ubicadas sobre los mismos puntos donde se ejecutaron los SCPTu, las mismas que fueron tomadas para la construcción de los modelos geotécnicos.
- Se consideró un peso específico total para el mineral de 19 kN/m^3 .
- El evento sísmico considerado corresponde a un $T_R = 475$ años, con $M_W = 7,5$ y con esfuerzos cíclicos obtenidos a partir de un ARS no lineal 1D.
- Si $\psi > -0,08$, entonces el mineral presentaría un comportamiento contractivo y su resistencia cortante no drenada se verá disminuida al movilizar su resistencia conforme se incrementa la deformación cortante del suelo. Este tipo de comportamiento indicaría que el mineral desencadenaría flujo por licuación.
- Si $I_c > 1,91$, entonces el mineral presentaría una presión de poros inicial en equilibrio (u_0), *i.e.* podría generar una condición saturada.
- Si $I_c > 2,60$, entonces el mineral presenta un comportamiento *clay-like* y no se espera licuación por flujo o cíclica típica de arenas sueltas, sino una disminución controlada de la rigidez
- Los datos de los SCPTu fueron reinterpretados considerando las u_0 estimadas de los ensayos de disipación (PPD, por sus siglas en inglés).
- La magnitud M_W estimada representa al terremoto que ocurriría en el sitio, no así a los que ocurrieran en las fuentes sismogénicas empleadas en el

estudio de riesgo sísmico. Asimismo, se debe recordar que el parámetro M_W en un procedimiento simplificado de potencial de licuación tiene como objetivo capturar los efectos de duración del terremoto y su definición no está directamente relacionada a la definición empleada en un estudio de peligro sísmico.

4.4.4 Resultados obtenidos

En las Figuras 4.11 a la 4.19 y Tabla 4.6 se muestran los resultados de la evaluación del potencial de licuación de la pila asociada a un periodo de retorno de 475 años y un $M_W = 7,5$, donde se puede observar zonas en color rojo que representan las capas que son potencialmente licuables de acuerdo con los criterios indicados en las condiciones de análisis (que es función del I_c , ψ , CRR/CSR) mientras que las zonas de color verde representan al mineral que percola solución sin problemas. Asimismo, se muestra en azul la frontera que representa al valor de K_{SAT} mínima permitida, por medio del I_c , por debajo del valor donde el mineral puede generar cargas de presión inducidas por la retención de solución.

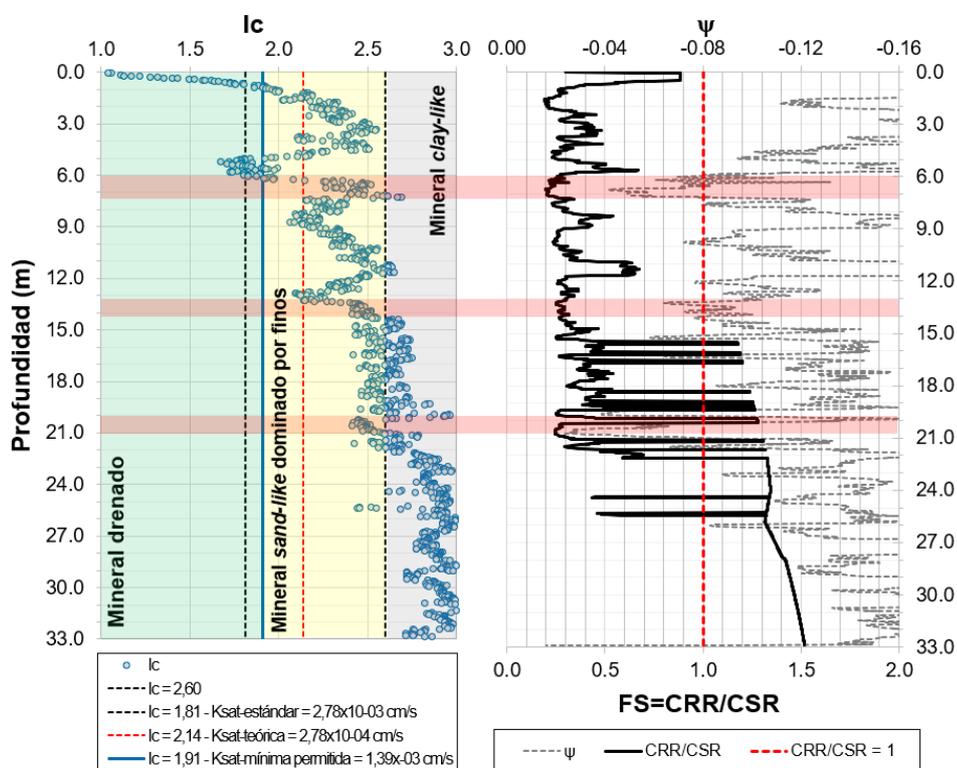


Figura 4.11 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-01.

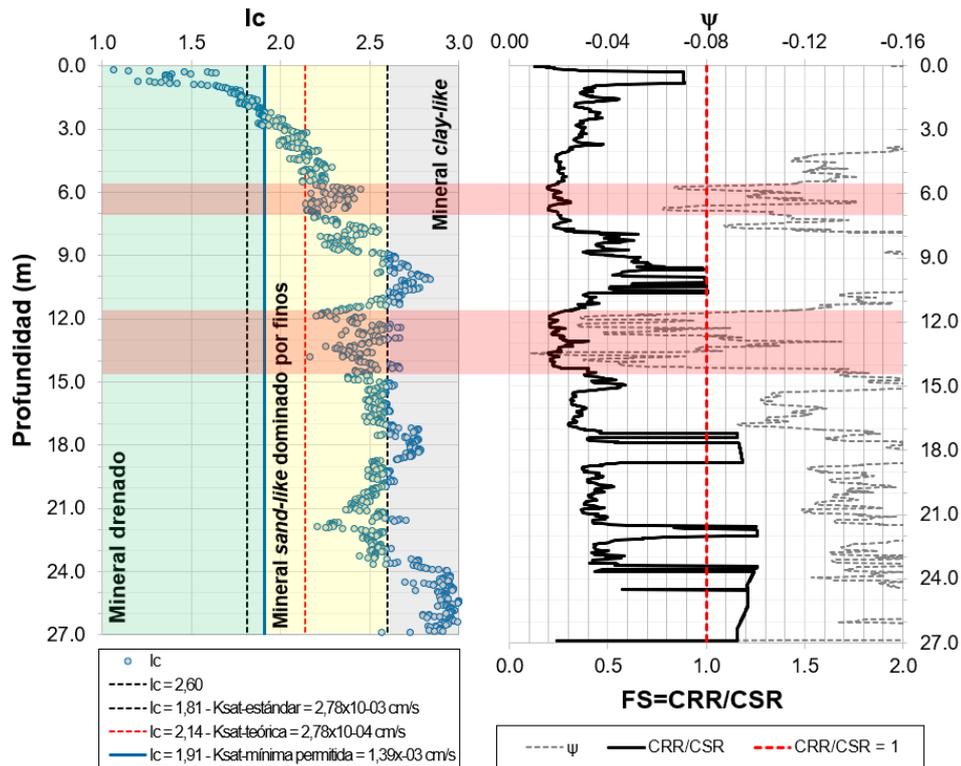


Figura 4.12 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-02.

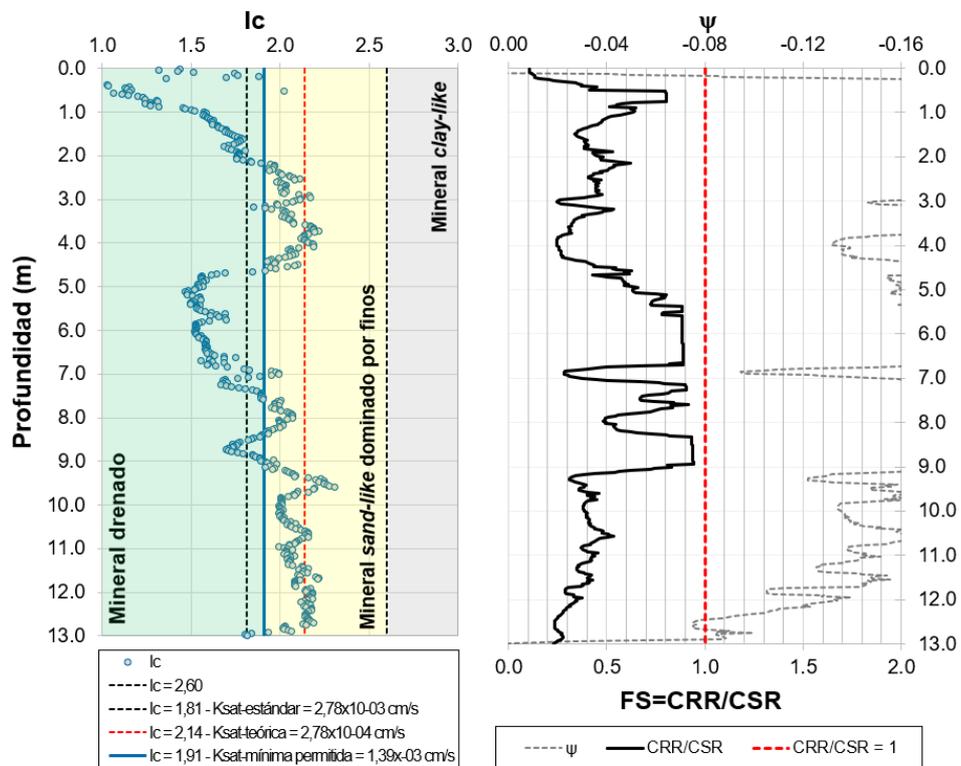


Figura 4.13 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-03.

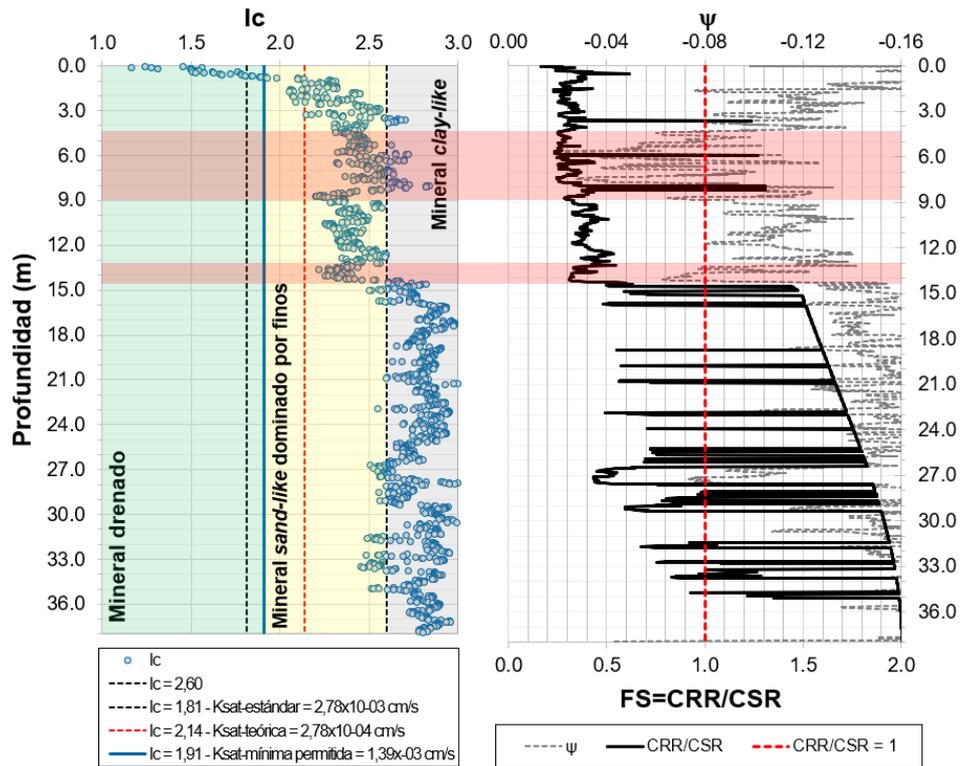


Figura 4.14 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-04.

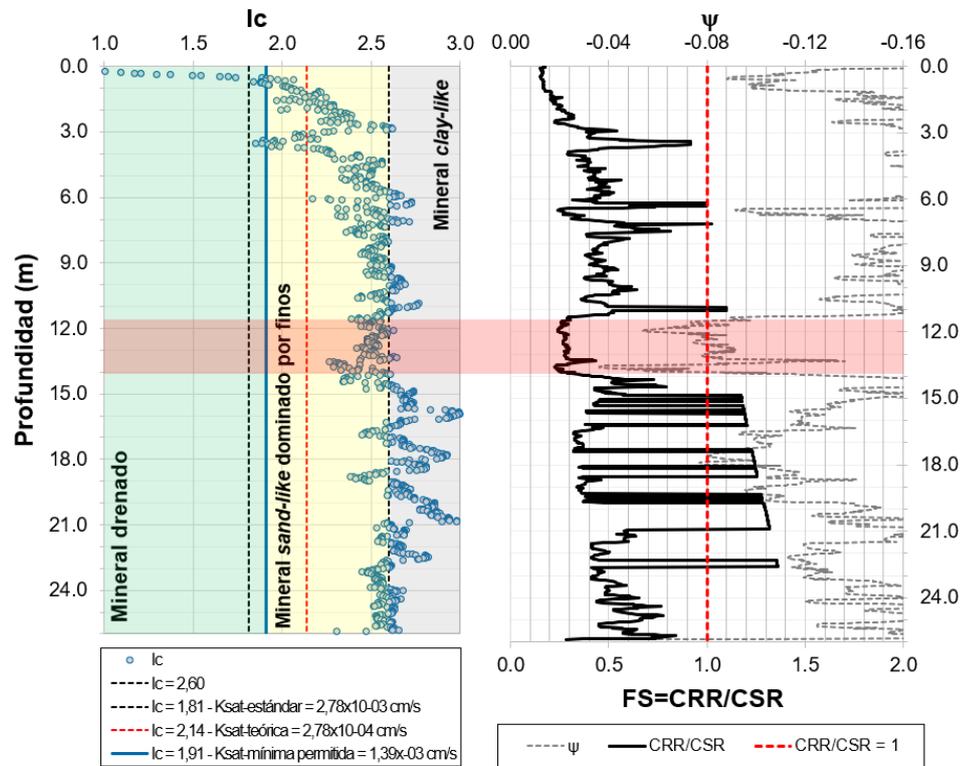


Figura 4.15 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-05.

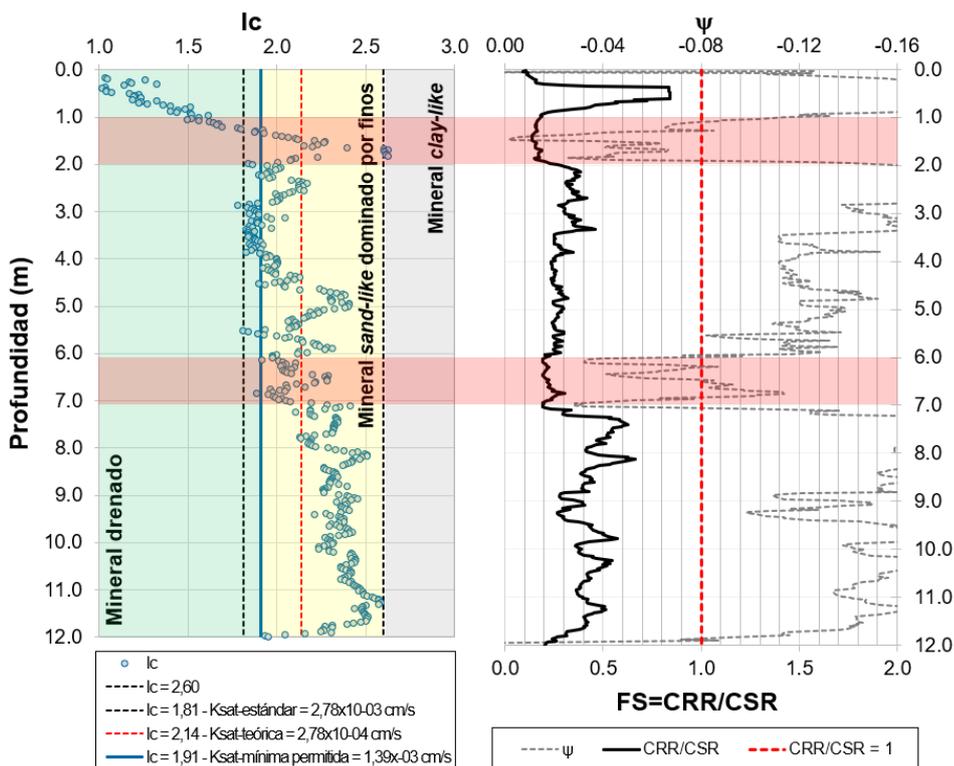


Figura 4.16 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-06.

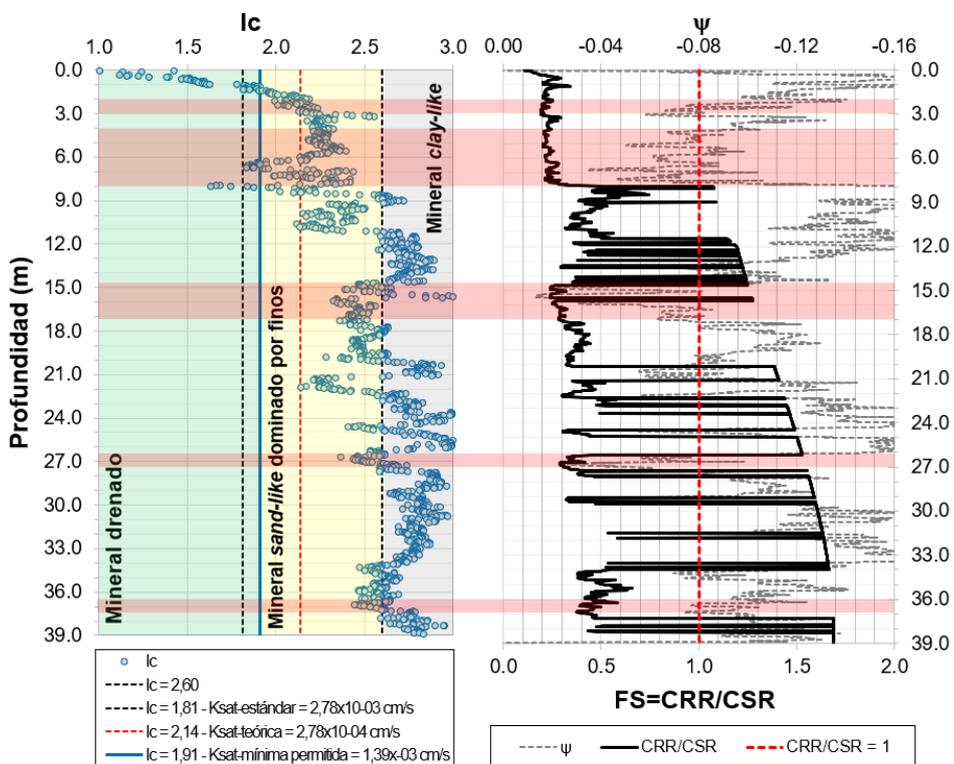


Figura 4.17 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-07.

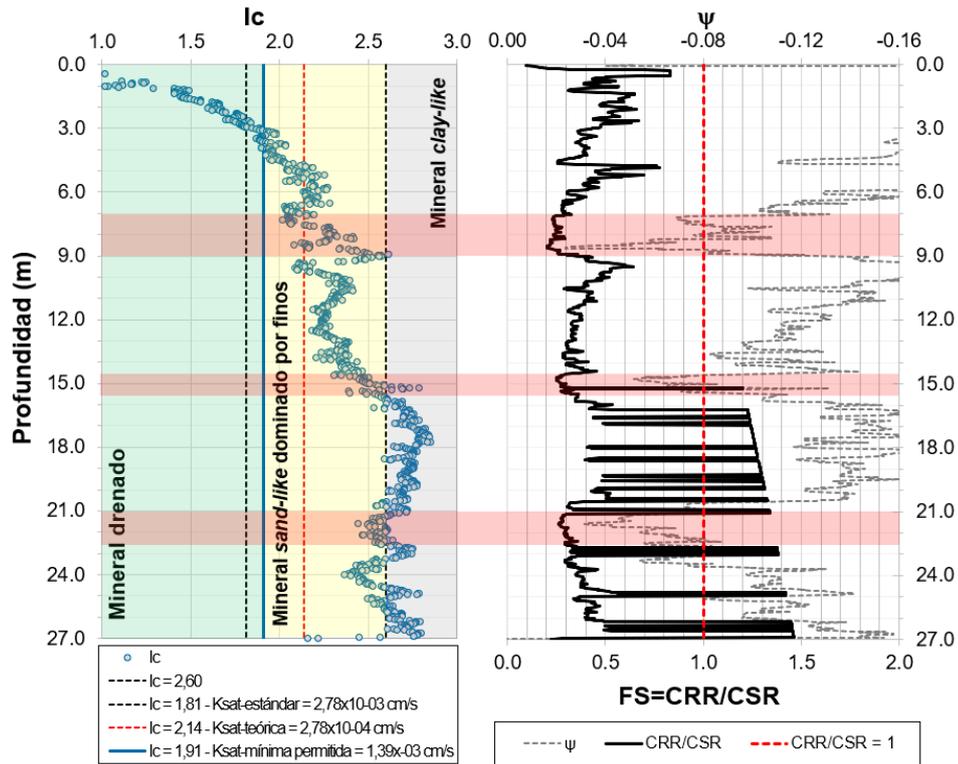


Figura 4.18 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-08.

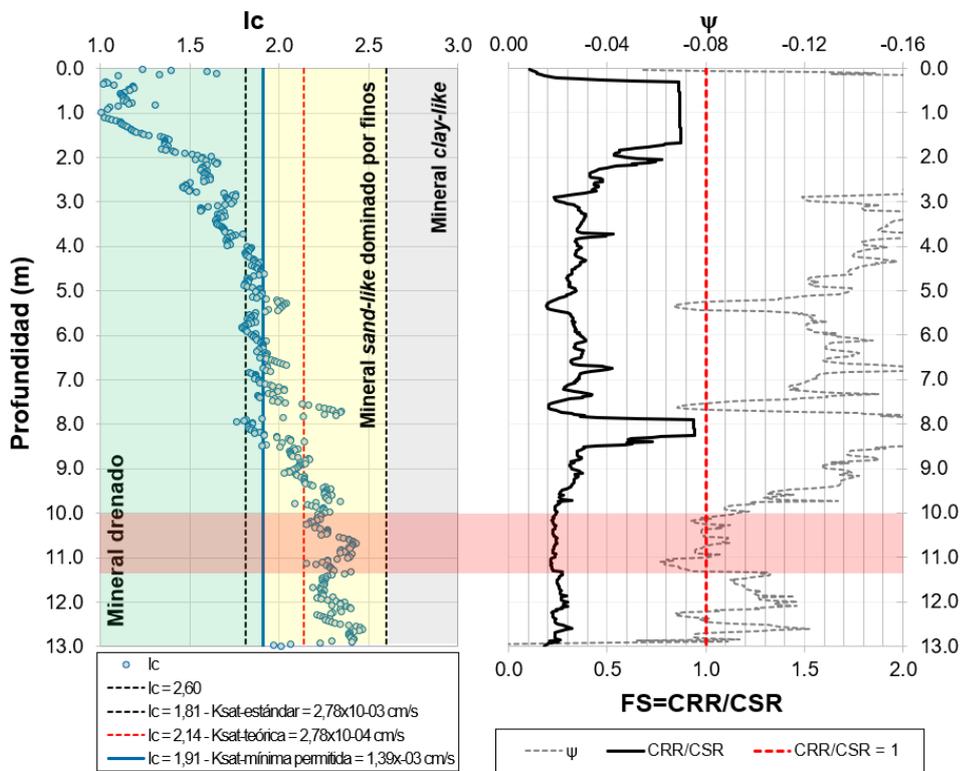


Figura 4.19 Evaluación del potencial de licuación según metodología propuesta para el sondaje SCPTu-09.

Se observa en las Figuras 4.11 a la 4.19 que $FS_{LIQ} = CRR/CSR \lll 1$ que muestra cómo el método simplificado tradicional puede resultar muy conservador (e.g. Youd *et al.*, 2001) si no se incluye la condición propuesta para la evaluación del desempeño de la pila en términos de K_{SAT} , mostrando que una gran extensión de mineral o casi toda la columna evaluada podría licuar.

Las capas sombreadas en rojo son resultado de la inclusión de los criterios planteados y son estas las que mayor investigación requieren en el control operativo, vigilancia y monitoreo de la pila de lixiviación.

En todas las gráficas se puede evidenciar que el factor de seguridad ante el desencadenamiento de la licuación (FS_{LIQ}) es marcadamente menor a 1,0 principalmente a profundidades menores a ~15 m, no obstante, en algunas capas se ha desestimado el criterio de comparación entre las relaciones cíclicas de resistencia y esfuerzo inducido por el terremoto, CRR y CSR, ya que no cumplieron con el requisito de presentar un estado contractivo (*i.e.* $\psi > -0,08$).

Si bien es cierto que, un suelo en estado dilatante no generaría un incremento de la presión de poros, sino más bien una disminución de esta, es posible que este pueda cambiar su estado a uno contractivo y cumplir con el criterio de estado *in situ* ($\psi > -0,08$) debido a la redistribución de presiones de poro que puede ocurrir durante un terremoto. No obstante, en el presente estudio se ha considerado que las capas de mineral que presentan un $\psi \leq -0,08$ no generarán un significativo incremento del exceso de presión de poros y, por lo tanto, no tienen posibilidad de lograr un estado nulo de esfuerzos efectivos.

Si bien la mayoría de las capas contractivas son licuables, existen capas contractivas de mineral *clay-like* a profundidad (mayor a ~15 m) que se descartan como capas licuables dado a que $I_c > 2,7$ y el $FSL_{LIQ} \gg 1$ (e.g. SCPTu-07, ~30 m de profundidad), dando coherencia al método propuesto según las características de la licuación en donde una arcilla no presenta licuación propiamente dicha y menos aún a grandes profundidades. Si bien es una capa de 01 SCPTu de 09, esto abre posibilidades de que el método planteado sea explorado en diferentes casos de análisis a fin de reforzar la metodología y validarla para estructuras que presenten una condición de cargas de presión hidrostáticas (e.g. presas de agua o de relave, terreno de cimentación con nivel de agua a pocos metros de profundidad).

La licuación en pilas de lixiviación está controlada por la capa continua o semicontinua más débil compuesta por materiales dominados por finos que se comportan como suelos similares a la arena, lo que hace que el enfoque por características físicas sea reemplazado por el enfoque de las características de comportamiento, e.g., el SBT (I_c).

Por lo tanto, cualquier evaluación de la estabilidad de taludes mediante equilibrio límite o análisis numérico debe centrarse en las capas más débiles identificadas a través del nuevo criterio propuesto, determinado cualitativa y cuantitativamente a partir de pruebas *in situ* de SCPTu.

Tabla 4.6
Profundidad de las zonas licuables (m)

1-1'			2-2'			3-3'		
SCPTu-01	SCPTu-02	SCPTu-03	SCPTu-04	SCPTu-05	SCPTu-06	SCPTu-07	SCPTu-08	SCPTu-09
6,5-7,5	5,5-7,0	No	4,5-9,0	11,5-14,0	1,0-2,0	2,0-3,0	7,0-9,0	
13,0-14,0	11,5-14,5	presenta	13,0-14,0		6,0-7,0	4,0-8,0	14,5-15,5	10,0-11,5
20,0-21,0						14,5-17,0	21,0-22,5	
						26,0-27,0		
						36,0-37,0		

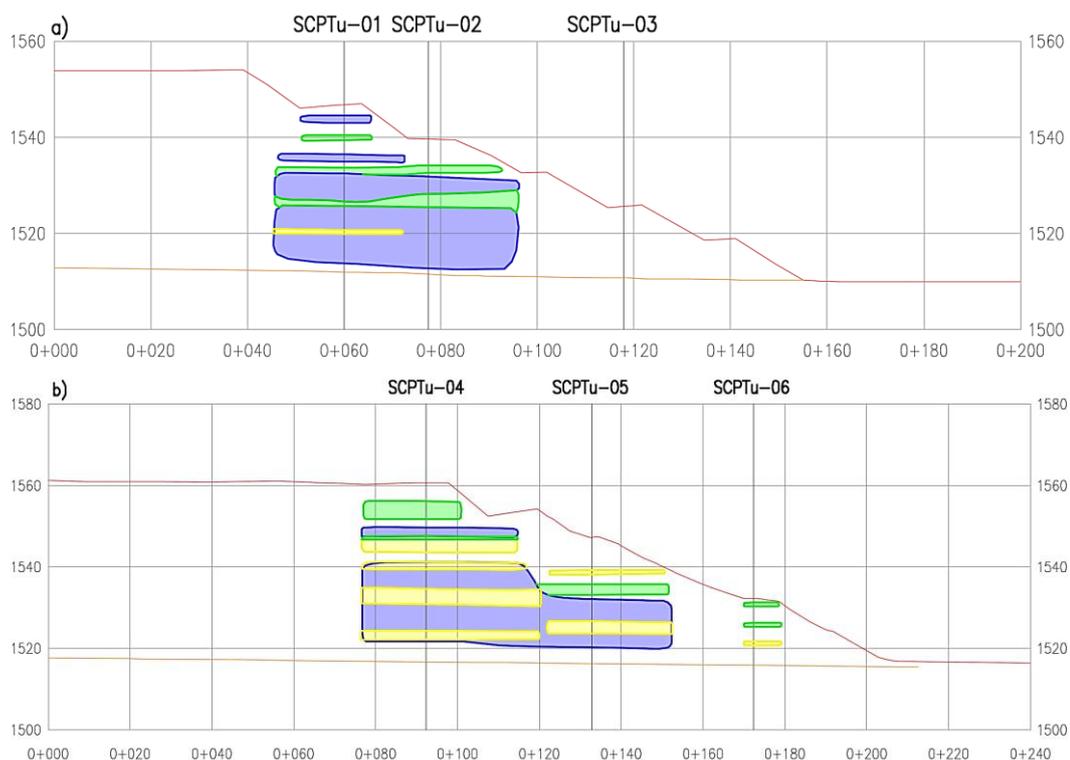
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES POSTSISMO

5.1 INTRODUCCIÓN

Como se expuso anteriormente, el mineral lixiviado dominado por finos puede generar condiciones no drenadas y podría presentar un escenario de licuación por flujo. En el presente capítulo se presentarán los parámetros geotécnicos, la metodología y condiciones de análisis para el desarrollo del análisis de estabilidad por equilibrio límite en las 03 secciones de análisis ubicadas en la zona crítica de la pila evaluada (ver Figura 3.4). La estabilidad será realizada bajo un escenario postsismo, *i.e.* uno estático en condición no drenada de las capas definidas en capítulos anteriores.

5.2 SECCIONES DE ANÁLISIS Y PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

En la Figura 3.11 se presentaron los modelos geotécnicos que representan las secciones de análisis. En estas se proyectaron las capas de suelo tipo *clay-like* ($I_B > 32$), mostradas en color azul, mientras que los materiales contractivos ($CD < 70$) en color amarillo, según la clasificación propuesta por Robertson (2016). Ahora también se incluirán las capas de mineral lixiviado licuables determinadas en el capítulo IV. La Figura 5.1 muestra los modelos geotécnicos completos que serán usados en los análisis de estabilidad de taludes.



Para el análisis postsismo, la resistencia fue estimada en función de un valor que corresponde al percentil 16 (P16) de una distribución de datos para intervalos o tramos en profundidad de las capas dominadas por finos y de las capas licuables. Las zonas dominadas por finos se caracterizarán con los perfiles de $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ presentados en el acápite 3.5.5 mientras que los licuables con los perfiles de S_{uLIQ}/σ'_{v0} presentados en el acápite 3.5.7.4. Por otro lado, como se indicó anteriormente todas las zonas contractivas serán caracterizadas con $S_{uLIQ}/\sigma'_{v0} = 0,25$.

La Tabla 5.2 resume los parámetros geotécnicos adoptados para las zonas dominadas por finos, contractivas y licuables en los análisis postsismo.

Tabla 5.2
Parámetros geotécnicos - Análisis postsismo

		Zonas en los modelos geotécnicos					
Sección	Sondaje	Dominadas por finos		Contractivos		Licuables	
		Prof. (m)	$S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$	Prof. (m)	S_{uLIQ}/σ'_{v0}	Prof. (m)	S_{uLIQ}/σ'_{v0}
1-1'	SCPTu-01	2,0 - 4,0	0,29				
		10,0 - 12,0	0,30	6,5 - 7,5	Licuable	6,5 - 7,5	0,14
		14,0 - 20,0	0,30	20,0 - 21,0	Licuable	13,0 - 14,0	0,17
		21,0 - 26,0	0,29	26,0 - 27,0	0,25	20,0 - 21,0	0,12
		27,0 - 33,0	0,30				
	SCPTu-02	8,0 - 11,5	0,30	11,5 - 14,5	Licuable	5,5 - 7,0	0,17
		14,0 - 27,0	0,30		11,5 - 14,5	0,12	
	SCPTu-03	No presenta		No presenta		No presenta	
2-2'	SCPTu-04			13,0 - 14,0	Licuable		
		11,0 - 13,0	0,31	14,0 - 17,0	0,25	4,5 - 9,0	0,13
		21,5 - 26,0	0,30	19,5 - 21,5	0,25	13,0 - 14,0	0,19
		30,0 - 36,0	0,31	26,0 - 30,0	0,25		
				36,0 - 38,0	0,25		
	SCPTu-05	15,0 - 20,5	0,29	8,0 - 9,0	0,25	11,5 - 14,0	0,18
		23,5 - 27,0	0,33	20,5 - 23,5	0,25		
	SCPTu-06	No presenta		10,5 - 11,5	0,25	1,0 - 2,0	0,10
					6,0 - 7,0	0,12	
3-3'	SCPTu-07					2,0 - 3,0	0,14
						4,0 - 8,0	0,15
		14,0 - 39,0	0,29	4,0 - 8,0	Licuable	14,5 - 17,0	0,12
						26,0 - 27,0	0,13
					36,0 - 37,0	0,23	
	SCPTu-08	4,0 - 11,5	0,30	11,5 - 13,5	0,25	7,0 - 9,0	0,15
		13,5 - 27,0	0,30		14,5 - 15,5	0,17	
					21,0 - 22,5	0,15	
	SCPTu-09	9,5 - 11,5	0,31	1,0 - 2,0	0,25	10,0 - 11,5	0,17

Símbolos y abreviaturas:

$S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$: relación de resistencia no drenada de fluencia

Prof.: profundidad

S_{uLIQ}/σ'_{v0} : relación de resistencia no drenada licuada

5.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para el análisis de estabilidad 2D por el método de equilibrio límite, se utilizó el software Slide2 versión 9.008 (Rocscience, 2020). El cálculo del factor de seguridad se realiza en cada sección de análisis, lo que permite llevar a cabo un análisis de forma bidimensional y aproximando el problema a un estado de deformaciones planas. Se empleó el método de equilibrio límite, incorporando el procedimiento riguroso de Spencer (1967), que satisface simultáneamente todas las ecuaciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos).

El análisis de estabilidad en condición postsismo considera que la masa involucrada en la falla está sometida a una fuerza vertical que corresponde al peso propio del mineral que se contrapone a la resistencia no drenada postlicuación a fin de tomar en cuenta de manera aproximada el efecto que resultaría en una falla por licuación cuando las capas de mineral lixiviado dominadas por finos llegan a licuar; es decir, cuando se conoce que dichas capas presentarían resistencias licuadas una vez ocurrida la acción del sismo. Por lo tanto, dicho análisis se ha realizado en secciones de análisis donde la evaluación de potencial de licuación ha identificado la existencia de capas licuables.

5.4 CRITERIOS Y CONDICIONES DE ANÁLISIS

Los factores de seguridad que se obtengan del análisis de estabilidad de taludes deben cumplir con los mínimos requeridos de acuerdo con el estándar aplicado en la industria geotécnica, que serán utilizados para definir el estado actual de la pila bajo diferentes escenarios de análisis y definir si esta requiere de medidas de estabilización. En la Tabla 5.3 se muestra los criterios de diseño adoptados.

Tabla 5.3
Criterios de diseño

Descripción	Unidad	Criterio usado
Parámetros de estabilidad de taludes		
Modelo de análisis de estabilidad (equilibrio limite)	modelo	Spencer
Periodo de retorno del evento sísmico	años	475
FS mínimo en condición estática drenada	FS	1,5
FS mínimo en condición estática no drenada	FS	1,3
FS mínimo en condición postsismo	FS	1,2

Por otro lado, las condiciones de análisis fueron las siguientes:

- El análisis se realizó para la configuración actual de la pila evaluada.
- El análisis de estabilidad de taludes se realizó para tres escenarios:
 - Estático drenado, donde se considerará a todo el mineral como drenado.
 - Estático no drenado, donde se considerará solo los materiales dominados por finos presentados en la Figura 3.11 y Tabla 3.4.
 - Postsismo, donde se considerará los materiales presentados en la Figura 5.1.
- Para los escenarios estático no drenado y postsismo, se ha considerado que todas las capas dominadas por finos, ante la incertidumbre de conocer si se desarrollan cargas de presión de poros dado a la ausencia de monitoreo, se desarrollarán condiciones no drenadas.
- El escenario postsismo representa el caso que no se realice control o monitoreo de las cargas de presión o que no se ejecuten acciones que lleven a disipar dichas cargas de presión y que por tanto las capas que retienen solución sean susceptibles a licuar.
- Las zonas consideradas no drenadas y licuables corresponden a la descripción expuesta en los capítulos III y IV.
- La asignación de una resistencia drenada al mineral se ha realizado para las capas que presenten un I_c menor a 1,91, que predominantemente se ubican en los sectores de menor esfuerzo de confinamiento efectivo dada su alta permeabilidad inferida.
- Para las capas de mineral del tipo *sand-like* que presentan un rango $1,91 < I_c < 2,6$ y que, por su parámetro de estado estimado el mineral califica como uno en estado dilatante ($\psi < -0,08$) también se les ha asignado una resistencia en condición drenada representada por un ángulo de fricción.
- El nivel de solución no se ha considerado explícitamente en los análisis, debido a que para la condición estática no drenada se está asignando una resistencia no drenada a las zonas dominadas por finos que han presentado cargas de presión de poros dinámicas durante la auscultación de los SCPTu. En el caso del escenario estático drenado se ha considerado conservadoramente un nivel de solución a 2 m por encima de

la interfase mientras que en los análisis estático drenado y postsismo dicho nivel de solución solo afecta al mineral lixiviado en condición drenada.

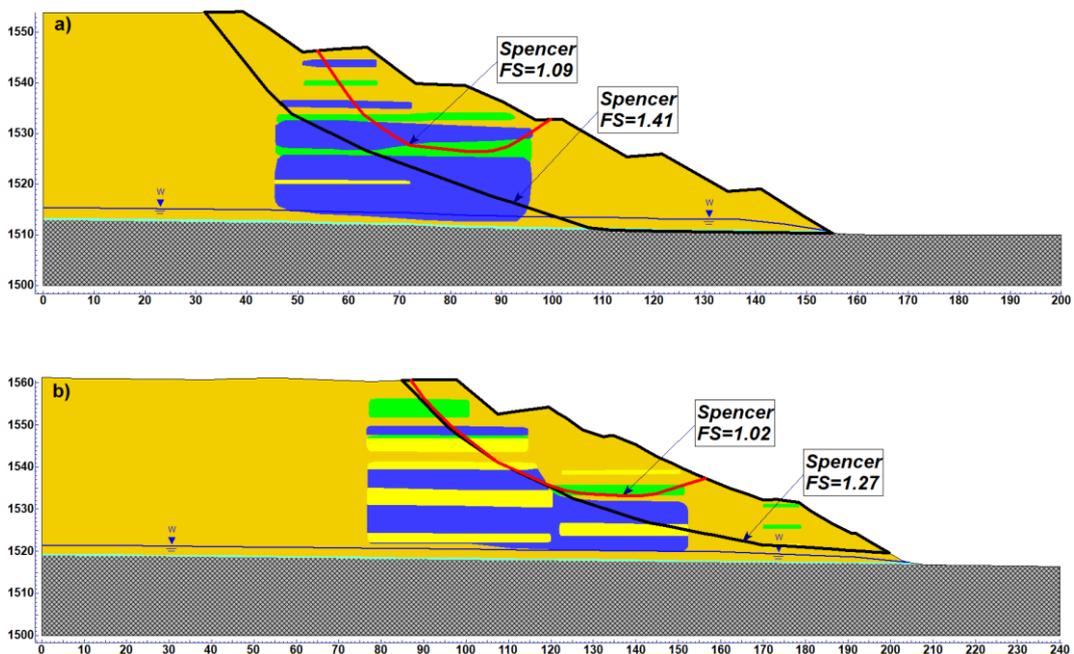
- Dado que la presente investigación no está vinculada a niveles de alerta y a registros de monitoreo de cargas de presión de poros, no se puede determinar el nivel de riesgo de desencadenamiento de la licuación. Por lo que se considera de forma conservadora que el escenario postsismo es inminente.
- Para la condición postsismo se han incluido las zonas potenciales de retención de solución en materiales del comportamiento del tipo *sand-like* si estos presentan un valor de permeabilidad menor a un valor patrón de $1,39 \times 10^{-3}$ cm/s que fue definido como un valor intermedio entre un valor de $2,78 \times 10^{-4}$ cm/s (equivalente a una tasa de riego de 10 L/h/m²) y un valor estándar en el diseño de $2,78 \times 10^{-3}$ cm/s que es un orden de magnitud menor que el equivalente a la tasa de riego. El valor estándar de diseño está representado por un valor de I_c de 1,91. Sabiendo que la frontera entre un suelo *sand-like* y uno *clay-like* puede ser representada por un I_c de 2,6, el rango de I_c que varía de 1,91 a 2,6 es el de interés dado que un material del tipo *sand-like* es más probable de licuar que uno *clay-like*. Este rango es el que se ha tomado de referencia para la evaluación del potencial de licuación en el mineral tipo *sand-like* presentado en el capítulo IV.
- Los factores de seguridad calculados de la condición postsismo asumen el desencadenamiento de la licuación durante el periodo de exposición de la pila en las capas identificadas como críticas o licuables suponiendo que esas capas bajo condiciones normales de riego lograrán cargas de presión o presiones de poro lo suficientemente altas como para desencadenar licuación. Esto es una suposición conservadora que se incluye implícitamente en los factores de seguridad reportados, y representan la condición de estabilidad de la pila sin ningún control o monitoreo piezométrico. Un análisis numérico podría indicar que eventualmente algunos materiales potencialmente licuables pueden no alcanzar la condición de licuación, tema que escapa de los objetivos de la presente investigación.
- Para la verificación de la estabilidad de la pila en un escenario postsismo, se supuso que la geometría de la pila es la misma que la geometría de

prefalla o antes de la ocurrencia del evento sísmico. Esto asume de antemano que las deformaciones que se desencadenen por la licuación serán controladas.

- Se analizaron fallas globales y locales de tipo compuesta en bloques de búsqueda a través del mineral, alternando la búsqueda entre el sector conformado por el mineral lixiviado licuado postsismo y el mineral lixiviado en condiciones drenadas, con énfasis en los sectores de materiales con predominio de finos potencialmente licuables, que es la condición más crítica que se presenta en las secciones analizadas.
- Las secciones de análisis, al ser bidimensionales, mantienen la consideración más conservadora en un análisis de estabilidad de taludes, es decir, prescinde de cualquier efecto tridimensional en favor de la estabilidad.

5.5 DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La Figura 5.2 presenta las superficies de falla estimadas en un escenario postsismo (ver Anexo D para observar las superficies de falla asociadas a los escenarios estáticos drenado y no drenado), las fallas de mecanismo local y global se muestran en rojo y negro, respectivamente. La Tabla 5.4 resume los factores de seguridad para los diferentes escenarios evaluados.



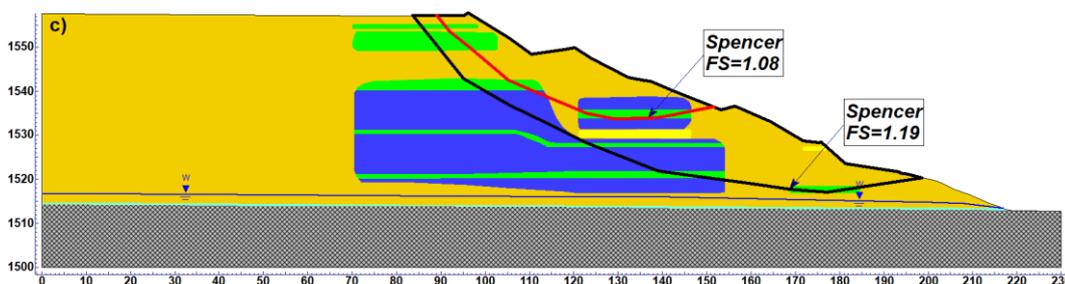


Figura 5.2 Mecanismos de falla local y global asociados al factor de seguridad calculado en las secciones de análisis (a) 1-1' (b) 2-2' (c) 3-3'.

Tabla 5.4
Factores de seguridad - Pila de lixiviación

Sección	Falla	Estático		Postsismo
		Drenado	No drenado	
1-1'	Local	1,67	1,57	1,09
	Global	1,78	1,52	1,41
2-2'	Local	1,55	1,51	1,02
	Global	1,69	1,42	1,27
3-3'	Local	1,70	1,45	1,08
	Global	1,80	1,42	1,19

De los resultados presentados en la Tabla 5.4 se observa que los factores de seguridad para la configuración actual de la pila de lixiviación para los escenarios estático drenado y no drenado (mecanismos de falla local y global) son mayores a los mínimos establecidos en los criterios de análisis. De darse el caso en que las cargas de presión de poros en las capas de la Tabla 5.2 sean monitoreadas y estas sean nulas, teniendo en cuenta que gran parte del mineral lixiviado se encuentra denso, y además si la pila lleva sin regar el tiempo necesario para que el mineral consolide, se podría considerar que la condición drenada para el escenario estático es la que determina la estabilidad de la pila, siendo aceptables los factores de seguridad calculados en este escenario.

Los factores de seguridad para el escenario postsismo para las fallas locales y la global de la sección 3-3' no cumplen con el mínimo requerido según los criterios de diseño. Los factores de seguridad asociados a este escenario y mostrados en la Tabla 5.4 representan la condición de estabilidad luego de ocurrido el terremoto de diseño sin tener control de las presiones de poros en las capas potencialmente licuables o sin ejecutar acciones que disipen dichas presiones.

5.6 ACCIONES RECOMENDADAS PARA MEDIR EL DESEMPEÑO GEOTÉCNICO DE LA PILA DE LIXIVIACIÓN EVALUADA

A continuación, se lista una serie de acciones que, a partir de la aplicación de ensayos SCPTu y la evaluación de taludes postsismo utilizando información asociada a dichos ensayos, permitirán medir el desempeño de la pila de lixiviación estudiada en la presente investigación.

5.6.1 Ejecución de sondajes SCPTu

El modelo geotécnico desarrollado en esta investigación demuestra las ventajas de construcción, definición de la extensión vertical y horizontal de las capas realmente críticas en una pila de lixiviación y de la posibilidad de caracterizar materiales a partir de los sondajes SCPTu de forma rápida y versátil. Los SCPTu permiten estimar o anticipar el comportamiento del mineral lixiviado en casi la totalidad de la altura de la pila de forma continua y a detalle en la dimensión vertical. Ello contrasta con una caracterización estándar en función de ensayos de laboratorio en muestras alteradas de manera discontinua y excepcionalmente dos o tres capas identificadas de acuerdo con una clasificación visual o subjetiva del ingeniero supervisor de las investigaciones de campo. Si bien es posible y algunas veces se ejecutan sondajes sísmicos para recuperar el núcleo de muestras con porcentajes de recuperación tan altos como del 95%, realizar ensayos en toda la profundidad de material auscultado es impracticable.

Al momento de elaborar un plan de trabajo para una campaña de sondajes SCPTu en una pila de lixiviación, se debe priorizar ubicarlos en las zonas donde existan indicios de mineral dominados por finos como encharcamientos de solución en la corona de la pila o humedecimientos en los taludes, por lo que se deberán ubicar de forma que se logre poder construir una sección 2D. De existir varias ubicaciones con dichos indicios, se deberá priorizar las zonas donde el impacto de un deslizamiento tenga las mayores consecuencias. Por otro lado, se debe considerar que es un reto poder realizar este tipo de ensayos dado a que el mineral es un material granular que puede presentar partículas mayores a 3", por lo que se debe evaluar el tipo de piezocono a utilizar y si se debiera emplear sondajes sísmicos para evitar el rechazo (además de ser ventajoso para la obtención de muestras) y continuar con la investigación una vez superado algún tramo rígido que es posible de encontrar en pilas.

Además, al poder construir los modelos geotécnicos como los mostrados en la Figura 5.1 y saber qué capas son las más críticas o licuables, se podrá conocer directamente a qué profundidad realizar el muestreo para realizar un programa especial de laboratorio con miras de ejecutar análisis más rigurosos (e.g. análisis numérico de esfuerzo-deformación) que se requiere para una precisión mejorada de las estimaciones según lo requiera el gestor del riesgo de la estructura en cuestión.

5.6.2 Monitoreo de cargas de presión de poros

Los resultados aquí reportados pueden ser vinculados a la relación intrínseca que existe entre la resistencia a la licuación con el exceso de presión de poros inducido por el terremoto, de tal manera que incluso empleando el marco de referencia del método simplificado, que es un análisis en esfuerzos totales, se puede dirigir el análisis hacia la carga de presión inicial en una capa saturada que es el aspecto que requiere de supervisión y monitoreo durante cualquier periodo de las operaciones de la pila de lixiviación.

Es posible también definir puntos de referencia o condiciones de borde para análisis de mayor rigor, del tipo numérico mediante modelos constitutivos, tanto para estimación de desplazamientos como para la estimación de cargas de presión transitorias bajo un régimen de flujo dominado por las decisiones de la operación en el ciclo, la tasa y el tipo de riego.

El aporte de este tipo de técnica de construcción del modelo puede ser multipropósito dado que constituye también una herramienta de gestión en la toma de decisiones dentro de la gestión del riesgo de los peligros múltiples en la operación de una pila de lixiviación. Además, dada la heterogeneidad del mineral en características físicas y de estado (contractivo-dilatante) y a la distribución espacial de sus propiedades hidráulicas, es necesario el uso del SCPTu para superar las limitaciones de la técnica estándar en investigaciones de campo y laboratorio y con base en las estimaciones del SCPTu instalar piezómetros en las capas que requieren ser monitoreadas. Monitorear las cargas de presión registradas en estos instrumentos ofrece la oportunidad de evitar la licuación, o de mitigar los efectos de las consecuencias si esta ocurriese. Permite anticipar al dueño de la mina o gestor del riesgo de la estructura un escenario de alta criticidad y gestionar con eficacia una eventual crisis.

5.6.3 Definición de cargas de presión de poros *threshold*

Como toda estructura geotécnica con consecuencias de fallas altas o extremas, se debe contar con niveles *threshold* o de alerta que sirvan para controlar o mitigar las consecuencias de un evento no deseado. Ya identificadas las zonas dominadas por finos, principalmente aquellas que son licuables según lo descrito en la presente investigación, e instalando piezómetros para cumplir con el monitoreo geotécnico recomendado en el punto anterior, se puede definir niveles de alerta en donde las cargas de presión no generen una condición no drenada o no activen flujo por licuación siempre que el nivel de esfuerzo sea lo suficientemente alto, *i.e.* > 2 atm. Los niveles de alerta pueden definirse mediante métodos analíticos o numéricos, pero se debe poner énfasis que éstas deben estar asociadas a cargas de presión de poros y no como nivel piezométrico dado que el régimen que gobierna en una pila no es el hidrostático.

5.6.4 Controles operacionales

Implementados los puntos anteriores, establecidos el monitoreo piezométrico y sus respectivos niveles de alerta, para el monitoreo y control de la estabilidad de los taludes de una pila con condiciones de cargas de presión de poros que no cumplen con el criterio de análisis para la condición postsismo y en cualquier otro sector donde se registre un incremento continuo en las cargas de presión de poros como consecuencia del riego en la cresta, se recomienda ejecutar las siguientes acciones en serie:

- Monitorear las lecturas de cargas de presión de poros en las capas críticas identificadas en los modelos geotécnicos de acuerdo con la tabla presentada en la Tabla 5.2.
- Si las lecturas superan el nivel de operación normal y se clasifican dentro de un nivel de alerta 1, entonces se deberán ejecutar las acciones listadas abajo. Estas pueden ejecutarse en serie siempre que la acción previa no haya logrado el objetivo de parar el incremento de las cargas de presión de poros o disiparlas hasta alcanzar los niveles mínimos.
 - Primera acción: instalación de *wick drains* que permita disipar las cargas de presión en las zonas dominadas por finos y críticas de acuerdo con el detalle presentando en la Tabla 5.2. Estos idealmente deberán ser instalados en los bancos de la pila donde fueron

ejecutados los sondajes SCPTu. Los *wick drains* se instalarán con espaciamientos que permitan lograr el objetivo de reducción de las cargas de presión.

- Segunda acción: reducción de la tasa de riego al mínimo operable y verificar la tasa de disipación de las cargas de presión.
- Tercera acción: alejamiento del riego en la cresta de la pila una longitud mínima a definirse entre el operador de la pila de lixiviación y el ingeniero geotécnico que evalúa la pila (e.g. EoR).
- Si las lecturas superan el nivel de emergencia 2, y luego de haber aplicado las acciones recomendadas del nivel de emergencia 1, y no se logra alcanzar la disipación efectiva de las capas críticas, entonces se deberá paralizar el riego en el sector.
- Si se supera el nivel de alerta 3, se deberá activar el plan de acción asociado al plan de emergencia de la pila.

CONCLUSIONES

Pilas de lixiviación con evidencias de material dominado por finos (e.g. empozamiento de riego, poca recuperación de solución rica) como la evaluada en el presente estudio, requieren de la aplicación de SCPTu a fin de construir modelos geotécnicos y realizar su respectiva caracterización para la evaluación de su estabilidad de taludes en condición postsismo.

El presente estudio logra plantear una metodología para la evaluación de estabilidad de taludes en condición postsismo de una pila de lixiviación que presenta mineral dominado por finos y potencialmente licuables a partir de la aplicación de sondajes SCPTu.

Bajo la aplicación de sondajes SCPTu, se logró identificar zonas de mineral lixiviado con comportamiento del tipo *clay* y *sand like* tanto dilatantes como contractivos, así como zonas que pueden retener solución. Según lo mencionado anteriormente, se logró caracterizar al mineral lixiviado y realizar un análisis de potencial de licuación bajo un enfoque de comportamiento del material y no de sus características físicas.

Se realizó el análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación en estudio en condiciones no drenadas y postsismo tomando como base los resultados de los sondajes SCPTu y su aplicación para la construcción de modelos geotécnicos.

Con los resultados obtenidos, se verifica la necesidad de realizar un análisis de estabilidad de taludes postsismo en pilas de lixiviación donde se conozca que el mineral a lixiviar proviene de yacimientos mineros con alto contenido de finos.

Se valida que con la aplicación de sondajes SCPTu se logra construir modelos geotécnicos que discretice al mineral que conforma una pila de lixiviación según su comportamiento, realizar una evaluación de potencial de evaluación y un análisis de estabilidad de taludes bajo un escenario postsismo.

Se ha comprobado la efectividad de poder construir modelos geotécnicos a partir de sondajes SCPTu. La aplicación de dichos sondajes en pilas de lixiviación se vuelve relevante dado que, a pesar de esperarse que los materiales apilados sean por lo general homogéneos, se ha evidenciado la presencia de material dominado por finos que pueden comportarse como arenas o como arcillas (*sand-like* o *clay-*

like) generados principalmente por su tajo de procedencia y sus sucesivos ciclos de riego y cuya caracterización se basa en su comportamiento mecánico e hidráulico basado en los registros de los SCPTu.

Se evidencia la ventaja de poder caracterizar el mineral lixiviado a través de su comportamiento por medio de sondajes SCPTu, dado que este puede ser capturado de forma continua y puede alcanzar profundidades que llegan hasta el nivel del revestimiento; a diferencia de poder realizar muestreos y ensayos de características físicas a diferentes profundidades, que si se utilizan para construir modelos geotécnicos se volvería impráctico dado a la cantidad de ensayos que se requeriría.

La ejecución de los sondajes SCPTu mejora la confiabilidad de los modelos geotécnicos con respecto a su extensión y a la identificación de las capas de mineral del tipo dominado por finos (*clay-like* y *sand-like*) y licuables, siendo esto materiales parte de los modelos geotécnicos utilizados para la evaluación de la estabilidad de taludes postsismo.

Se evidencia la presencia de mineral lixiviado dilatante, así como también contractivo en menor medida, según la interpretación de los SCPTu a partir del comportamiento del suelo (SBT) y las recomendaciones de Robertson (2016). Por lo tanto, la pila evaluada es propensa a presentar flujo por licuación o licuación cíclica, por lo que incluir capas licuables según los resultados del potencial de licuación representa la condición más desfavorable de la pila.

Con la correlación entre el índice de comportamiento (I_c) y valores de permeabilidad (estándar y mínima) se ha logrado identificar el mineral lixiviado que puede retener solución originando cargas de presión de poros. Esto ha permitido implementar el método simplificado para la evaluación del potencial de licuación en un medio de características muy variables como lo es una pila de lixiviación y no en suelos naturales estratificados como la mayoría de los casos historia utilizados por diferentes autores sobre licuación.

La caracterización geotécnica realizada es representativa de cada condición evaluada. Se ha logrado caracterizar mediante un valor de ángulo de fricción interna para el mineral drenado y a través de relaciones no drenadas para la condición estática no drenada y postsismo. Se ha obtenido valores de relación de

resistencia no drenada de forma decreciente para $S_{u(\text{remolded})}/\sigma'_{v0}$, $S_{u(\text{yield})}/\sigma'_{v0}$ y $S_{u\text{LIQ}}/\sigma'_{v0}$ siendo coherente con la práctica en la ingeniería geotécnica.

Para la evaluación del potencial de licuación se ha considerado la metodología propuesta por Robertson (2009b), desarrollada a partir del trabajo realizado por Robertson y Wride (1998), que se basa principalmente en el parámetro denominado índice de comportamiento de suelo (I_c) que es uno asociado a la clasificación del suelo de acuerdo con el tipo de comportamiento estimado en función de la presión de punta (q_c), fricción de fuste (f_s) y presión dinámica de poros (u_2). Esta metodología presenta una ventaja para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente estudio (que busca construir modelos geotécnicos a partir del comportamiento del mineral lixiviado) a diferencia de aquellas metodologías que puedan basar sus estimaciones en características físicas reflejadas en el contenido de finos del material analizado, como es el caso de Boulanger e Idriss (2014)

El periodo de retorno de 475 años adoptado para la evaluación del potencial de licuación es coherente con el tiempo de exposición de una estructura geotécnica como lo es la pila de lixiviación. Los resultados muestran que para dicho T_R se tienen condiciones críticas que deberán mitigarse mediante un plan de acción. La misma evaluación para un mayor T_R , deberá adoptar condiciones de análisis diferentes que no conlleven a adoptar medidas conservadoras (e.g. adoptar un MCE para la operación y no solo para la condición del cierre de la pila evaluada).

Se ha realizado una evaluación del potencial de licuación mediante un método simplificado de acuerdo con el criterio propuesto en el Capítulo IV para pilas de lixiviación que se basa en la inclusión del parámetro de estado y de la permeabilidad estándar de diseño en pilas. En general, se trata de identificar por medio de esta metodología propuesta, a las capas sueltas que por su propio estado *in situ* desencadenarán flujo por licuación.

Los resultados del análisis del potencial de licuación muestran mayormente un comportamiento dilatante del mineral lixiviado. Por lo tanto, si el mineral alcanzara la condición mínima para desencadenar licuación, su comportamiento postsismo presentará características cercanas a un material dilatante que influiría a favor de la resistencia cortante del mineral, por lo que se espera que los desplazamientos

que se generarían ante la eventual ocurrencia de un sismo, como el adoptado en el presente estudio, sean controlados.

Con la metodología propuesta a través de la aplicación del SCPTu para la evaluación del potencial de licuación en el presente estudio, se ha logrado que el enfoque por medio de características físicas según la literatura existente sea reemplazado por el enfoque de las características según el comportamiento (I_B , I_C) al lograr que un escenario de licuación se encuentre controlado por la capa de mineral lixiviado suelto o contractivo y dominado por finos que se comporta como una arena y puede saturarse al poder retener solución.

En el análisis de estabilidad de taludes, se ha observado la variación de los factores de seguridad que se han presentado de manera referencial a fin de mostrar las ventajas que supone el uso del enfoque de las características de comportamiento en los diferentes escenarios analizados (principalmente el postsismo), siendo dichos escenarios el estático drenado que es la condición más ideal o favorable mientras que el postsismo, que es la relacionada con las condiciones que presentan la pila evaluada bajo la aplicación de ensayos SCPTu, la que presentan factores de seguridad por debajo del mínimo admisible y donde las superficies de falla representarían un riesgo a la operación de la pila.

El análisis de estabilidad de taludes postsismo ha demostrado ser representativo en la pila de lixiviación con presencia de mineral lixiviado dominado por finos, dado a la capacidad que tiene este tipo de mineral a retener solución y generar condiciones no drenadas según la construcción de los modelos geotécnicos y su respectiva caracterización geotécnica realizada a partir de la ejecución de ensayos SCPTu.

Las fallas locales bajo un escenario postsismo no cumplen con el factor de seguridad mínimo requerido, siendo este escenario uno a considerar como modo de falla para la implementación de un plan de acción o contingencia ante un evento no deseado como la falla del talud después de algún evento sísmico asociado a un $T_R = 475$ años. Este escenario no habría sido posible identificar sin haber realizado la construcción de los modelos geotécnicos bajo la metodología presentada en la presente investigación, donde el ensayo SCPTu es el ensayo más influyente.

De confirmarse la condición drenada del mineral lixiviado a través de monitoreo de las cargas de presión y otros factores como cese del riego, los factores de seguridad del análisis estático drenado es la que determina la estabilidad de la pila.

La condición postsismo representa la estabilidad luego de ocurrido el terremoto de diseño sin tener control piezométrico o sin ejecutar acciones que disipen las cargas de presión de las capas críticas. Dado que se asume que la pila no cuenta con monitoreo, la estabilidad postsismo no cumple con los criterios de diseño establecidos, asumiendo un posible deslizamiento después de ocurrido el terremoto de diseño. Esta conclusión evidencia la ventaja de poder construir modelos geotécnicos a través de la metodología propuesta en lugar de las características físicas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir la metodología para la construcción de modelos geotécnicos propuesta en la presente investigación debido a que simplifica sustancialmente la gestión de campañas geotécnicas sucesivas (que incluye extracción de muestras y extensos programas de laboratorio) y mejora la confiabilidad en la extensión de las capas críticas en una pila de lixiviación que son las que están dominadas por su matriz fina.

La ejecución de sondajes SCPTu ha permitido caracterizar el mineral lixiviado de la pila con presencia de mineral dominado por finos según su comportamiento. Se recomienda que estos sondajes puedan ser duales, *i.e.* con aplicación de perforaciones sónicas a fin de muestrear el mineral que según su comportamiento conformaría las capas críticas y así elaborar con base en dichas muestras un programa de laboratorio de ensayos que permitan obtener la respuesta cíclica del mineral a condiciones de estado (ψ igual, menores y mayores a $-0,08$) según los identificados en el presente estudio. Esto permitiría elaborar análisis más sofisticados como análisis numéricos esfuerzo-deformación que podría formar parte de un próximo nivel de investigación en este tipo de pilas.

Si bien las secciones de análisis se encuentran relativamente cercanas, se observa la variabilidad del comportamiento del mineral lixiviado según lo procesado en los sondajes SCPTu. Por lo que, si se identifica zonas de riesgo por presencia de mineral dominado por finos, se recomienda ejecutar una campaña de este tipo de sondajes siguiendo una distribución similar presentada en la presente investigación.

Los sondajes SCPTu permiten caracterizar el mineral en profundidad mientras que la extensión horizontal puede ser definida según la variabilidad del comportamiento entre un sondaje y otro. Sin embargo, es recomendable que se realice un cruce de información con las características del mineral apilado por celdas a fin de saber cuántas de ellas han recibido la misma cantidad de ciclos de lixiviación y así poder extrapolar la interpretación en zonas donde no se hayan ejecutado sondajes SCPTu.

La permeabilidad (K_{SAT}) a través del comportamiento (I_C) se obtuvo a través de la correlación propuesta por Robertson (2010a). Si bien es un punto de partida útil

según los resultados de la presente investigación, se recomienda que, de contar con una campaña de investigaciones de campo con extracción de muestras, se realice ensayos de permeabilidad y consolidación a fin de seguir la metodología propuesta por Robertson (2010a) y obtener una correlación más representativa de los materiales de la pila de lixiviación evaluada.

Se ha comprobado la aplicabilidad de los sondajes SCPTu para construir modelos geotécnicos como los mostrados en la Figura 3.11. Sin embargo, es recomendable ejecutar sondajes intermedios a fin de aumentar la confiabilidad del modelo geotécnico, principalmente entre los SCPTu-02 y 03 de la 1-1' o entre los SCPTu-07 y 08 de la 3-3', que podrían confirmar la presencia de alguna capa contractiva o licuable que no ha podido ser capturada por los SCPTu recopilados. Adoptar medidas conservadoras en la construcción de los modelos geotécnicos permitirán cubrir el sesgo desfavorable de la ausencia de estos sondajes intermedios.

No se ha observado la influencia del comportamiento dinámico del material en los perfiles de relación de esfuerzo cíclico (CSR), que fueron obtenidos por el modelamiento del material utilizando curva del tipo suelo con contenido de finos (Darendeli, 2001), por lo que se recomienda una correcta caracterización de las propiedades dinámicas a través de ensayos de laboratorio (e.g. RCTS) para no tener que necesariamente utilizar las curvas existentes en la literatura técnica.

Las capas críticas que se lleguen a identificar por medio de una evaluación del potencial de licuación por medio de la metodología planteada en esta investigación como las mostradas en las Figuras 4.11 a la 4.19 deberán servir para plantear un plan de acción que conlleven a mejorar el control operativo, la vigilancia y el monitoreo de la pila evaluada.

Se recomienda que todo análisis para evaluar el desempeño de la pila tomando como base registros de sondajes SCPTu (e.g. análisis de estabilidad de taludes por equilibrio límite o análisis numérico esfuerzo-deformación en condición estática o dinámica) deberá centrarse en las capas débiles identificadas a partir de la evaluación del potencial de licuación propuesta en el presente estudio.

Por lo general, toda estructura geotécnica cuenta con monitoreo geotécnico, principalmente una pila de lixiviación que se encuentra bajo los efectos del riego de una solución química. De no contar con monitoreo, se recomienda tomar de

guía la metodología propuesta en la presente investigación para la identificación, según su comportamiento, de capas de mineral lixiviado que sean dominadas por finos, contractivas o licuables. En su defecto, se puede utilizar también para complementar el monitoreo de cargas de presión de poros en pilas que han comenzado a retener solución.

Se recomienda identificar el tipo de mineral que se va a disponer en la pila de lixiviación e ir monitoreando su comportamiento durante la aplicación de diferentes ciclos de lixiviación dado que al generarse una zona no drenada licuable podría generar escenarios de fallas más probables bajo una condición dinámica.

El control del desempeño de la pila de lixiviación debe estar en función del control y monitoreo de los piezómetros que se lleguen a instalar de acuerdo con lo propuesto en la presente investigación. En la pila evaluada, se recomienda instalar piezómetros de cuerda vibrante a fin de mantener bajas las cargas de presión asociadas a las capas críticas identificadas en los modelos geotécnicos y disipar cualquier incremento que se presente como resultado del inicio o reinicio del riego en cresta.

La estimación del parámetro de estado y la resistencia no drenada licuada a partir de formulaciones empíricas, así como los análisis de respuesta sísmica, potencial de licuación y estabilidad de taludes requieren adoptar supuestos y condiciones de análisis reconociendo las ventajas y limitaciones de cada procedimiento realizado en el presente estudio. Se recomienda mantener y continuar la línea de investigación implementando información geotécnica tanto de campo como de laboratorio, a fin de cubrir incertidumbres de los diferentes comportamientos y estados *in situ* del mineral lixiviado y realizar análisis sofisticados (e.g. análisis numérico esfuerzo-deformación) que permitan obtener resultados asociados a desplazamientos, exceso de presión de poros y otros parámetros que permitan mejorar el control operativo de la pila de lixiviación.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N. A. (1992). Non-stationary spectral matching. *Seismological research letters*, 63(1), 30.
- Al Atik, L., & Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake spectra*, 26(3), 601-617. <https://doi.org/10.1193/1.3459159>.
- Armstrong, R. J., & Malvick, E. J. (2016). Practical considerations in the use of liquefaction susceptibility criteria. *Earthquake spectra*, 32(3), 1941-1950. <https://doi.org/10.1193/071114EQS100R>.
- Been, K., Crooks, J. H. A., & Jefferies, M. G. (1989). Interpretation of material state from the CPT in sands and clays. In *Penetration testing in the UK: Proceedings of the geotechnology conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in Birmingham on 6-8 July 1988* (pp. 215-218). Thomas Telford Publishing.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2006). Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(11), 1413-1426. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1413\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1413)).
- Bray, J. D., & 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)).
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* [Ph.D. Dissertation]. The university of Texas at Austin.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., & Stewart, J. P. (2016). Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(9), 04016042. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001496).
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5), 2348-2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>.
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2016). DEEPSOIL 6.1, User Manual, Urbana, IL, Board of

- Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign. *Erişim adresi: http://deepsoil.cee.illinois.edu/Files/DEEPSOIL_User_Manual_v6.pdf*.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 26(2-4), 115-130. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.023>.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil liquefaction: a critical state approach*. CRC press.
- Kulhawy, F. H., & Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design* (No. EPRI-EL-6800). Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group.
- Landa, R. (2022). *Influencia de la Microestructura y Deformación Cortante Cíclica de Mineral Lixiviado en el Desencadenamiento de la Licuación* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/24837>.
- Laura, E. (2018). *Optimización del sistema de riego en el pad de lixiviación de la unidad Cuajone - Southern Perú* [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio institucional UNJBG. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/1718>.
- Lunne, T., Powell, J. J., and Robertson, P. K. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC Press.
- Lupo, J. F. (2010). Liner system design for heap leach pads. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.006>.
- Negrón, J. (2015). *Análisis de respuesta sísmica y cálculo de desplazamientos permanentes inducidos por sismo en una pila de lixiviación* [Informe de suficiencia de título profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Olson, S.M. (2001) *Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance* [Ph.D. Dissertation]. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Olson, S.M. and Stark, T.D. (2002) Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 629-647. <https://doi.org/10.1139/t02-001>.
- Olson, S. M., and Stark, T. D. (2003). Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments. *Journal of Geotechnical and*

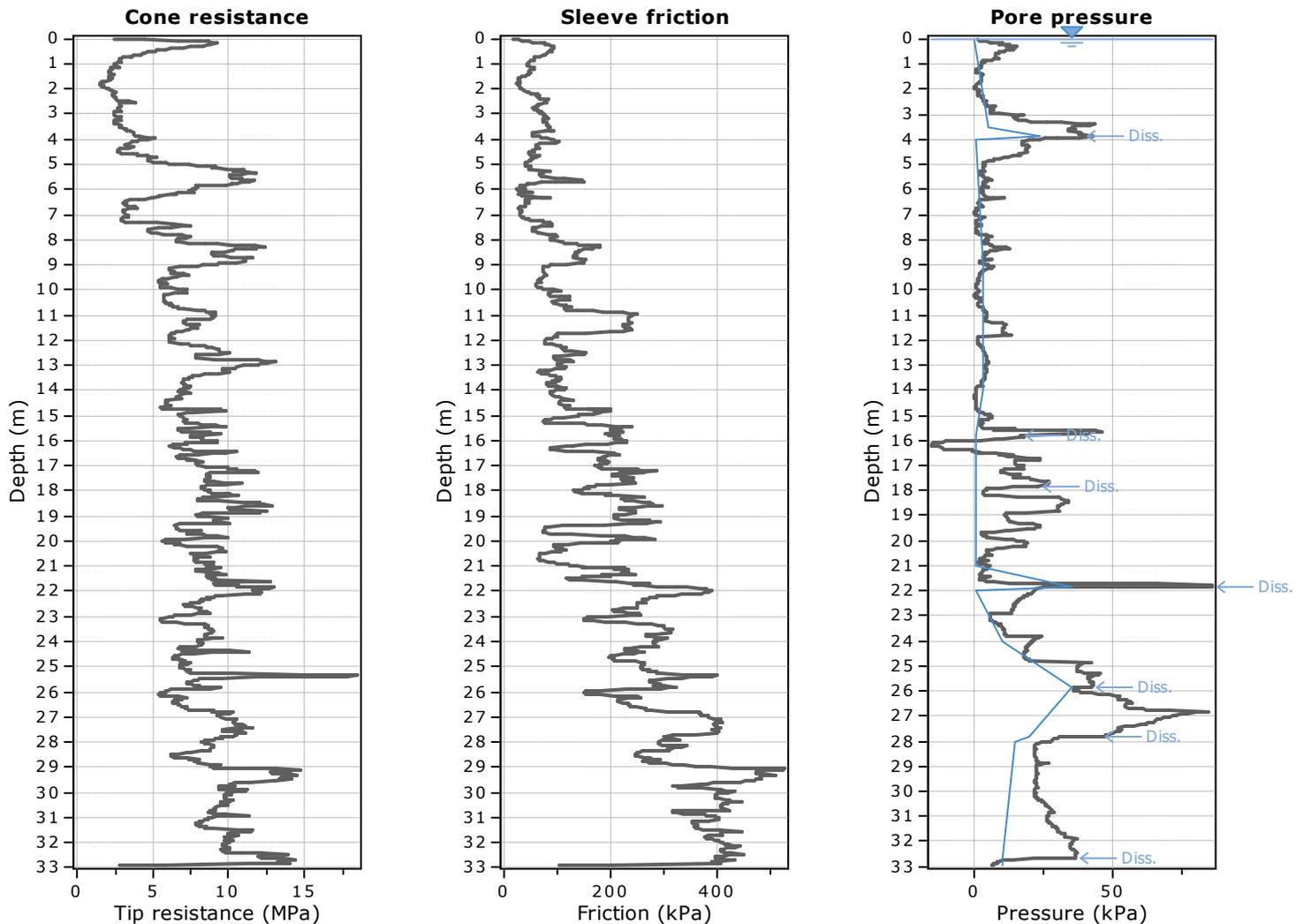
- Geoenvironmental Engineering*, 129(8), 727-737. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:8\(727\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:8(727)).
- Plewes, H.D., Davies, M.P. and Jefferies, M.G. (1992) CPT based screening procedure for evaluating liquefaction susceptibility. In *Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference, Toronto, Ont* (Vol. 4, pp. 1-9).
- Repetto, P. C., Wartman, J., & Rodriguez-Marek, A. (2003). Mines-Geotechnical Aspects. *Earthquake Spectra*, 19(1_suppl), 57-72. <https://doi.org/10.1193/1.1737251>.
- Robertson, P. K., Woeller, D. J., & Finn, W. D. L. (1992). Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(4), 686-695. <https://doi.org/10.1139/t92-075>.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E. (1998) Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459. <https://doi.org/10.1139/t98-017>.
- 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. In *Proceedings of the International Conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering* (pp. 3-20). IS Tokyo.
- Robertson, P. K. (2010a). Estimating in-situ soil permeability from CPT & CPTu. In *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing* (pp. 535-542). California State Polytechnic University Pomona, CA.
- Robertson, P.K. (2010b). Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from the CPT. In *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. California State Polytechnic University Pomona, CA.
- Robertson, P.K. (2010c). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6), 842-853. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000286).
- 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. (2021). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 59(4), 620-624. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0657>.
- Robertson P.K. and Cabal K.L. (2022). Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. *California: Gregg Drilling Testing, Inc.*

- Rocscience (2020). Slide v9.008 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Rocscience, Inc. (www.rocscience.com), Toronto, Ontario.
- Schneider, J.A., Randolph, M.F., Mayne, P.W., and Ramsey, N.R. (2008). Analysis of factors influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11), 1569-1586. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:11\(1569\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:11(1569)).
- Schneider, J.A., Hotstream, J.N., Mayne, P.W., and Randolph, M.F. (2012). Comparing CPTU Q-F and $Q-\Delta u_2/\sigma'_{v0}$ soil classification charts. *Géotechnique Letters*, 2(4): 209-215. <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00044>.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*. https://digitalcommons.calpoly.edu/cenv_fac/8.
- Shuttle, D. A., & Cunning, J. (2007). Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1), 1-19. <https://doi.org/10.1139/t06-086>.
- Shuttle, D.A. and Cunning, J. (2008) Reply to discussion: Liquefaction potential of silts from CPTu. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(1), 142-145.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>.
- Valdivia, R. (2016). *Análisis geotécnico de una pila de lixiviación con mineral de baja permeabilidad* [Informe de suficiencia de título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/4509>.
- Van Zyl, D. J., Hutchison, I. P., & Kiel, J. E. (1988). *Introduction to evaluation, design, and operation of precious metal heap leaching projects*. Society for Mining Metallurgy.

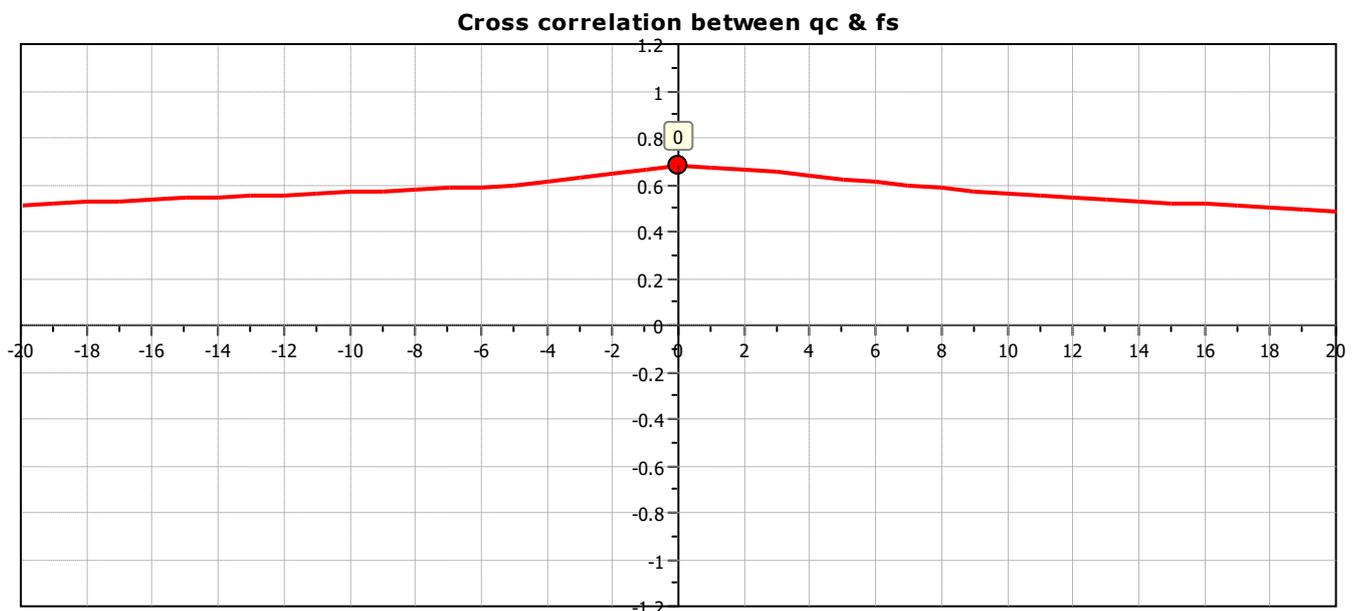
ANEXOS

Anexo A - Perfiles de registros y procesamiento de sondajes SCPTu	145
Anexo B - Ajuste espectral a un periodo de retorno 475 años	191
Anexo C - Ajuste de la variación del CSR con la profundidad	199
Anexo D - Distribución de datos para $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ y S_{uLIQ}/σ'_{v0}	203
Anexo E - Análisis de estabilidad de taludes en la pila de lixiviación	216

Anexo A - Perfiles de registros y procesamiento de sondajes SCPT_u

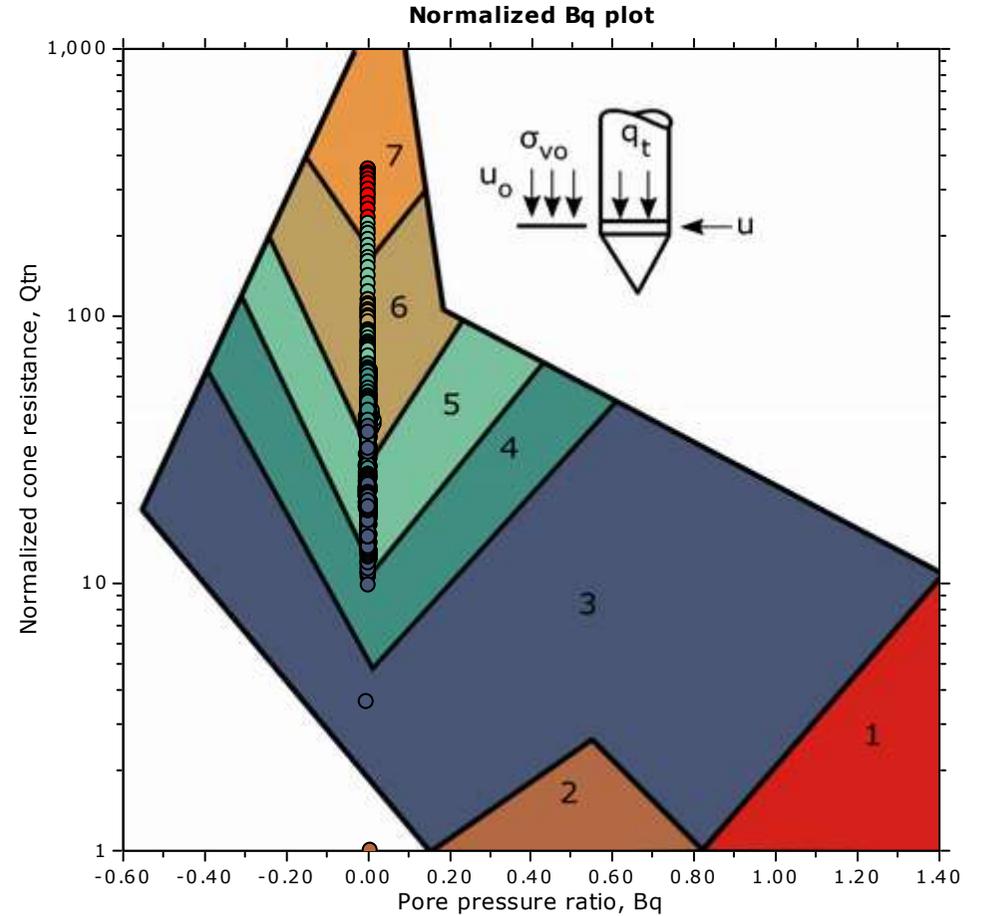
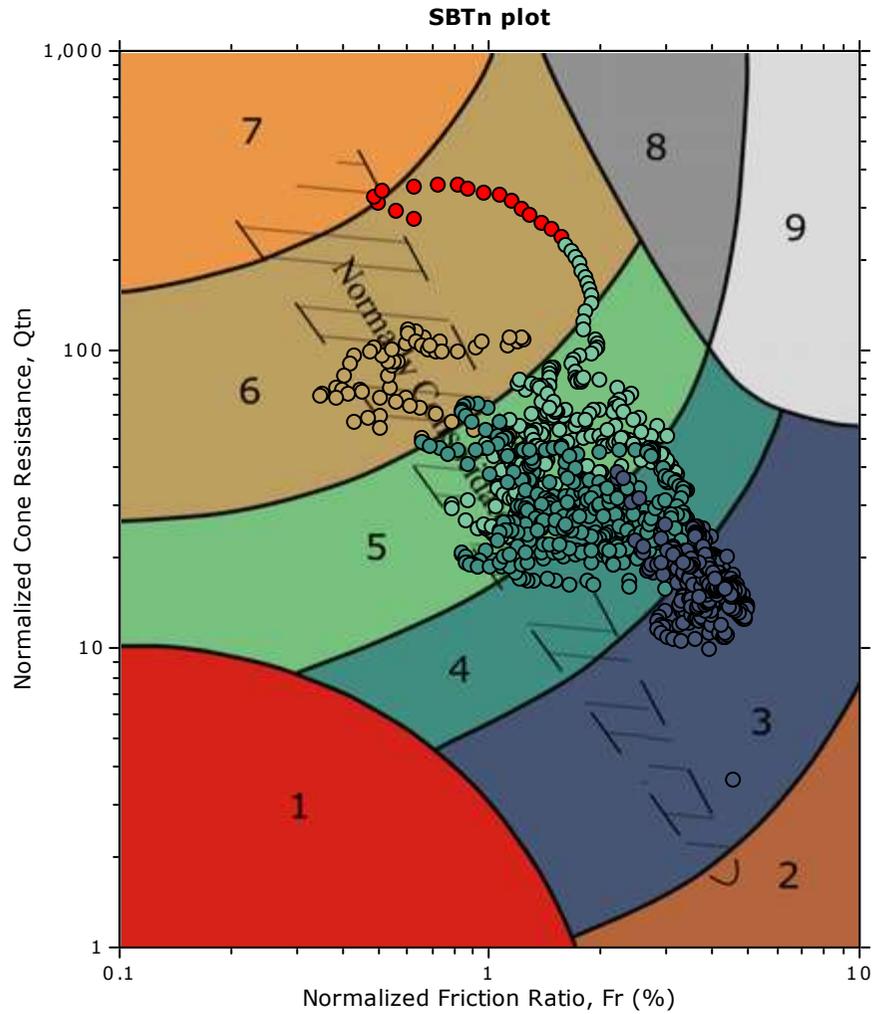


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



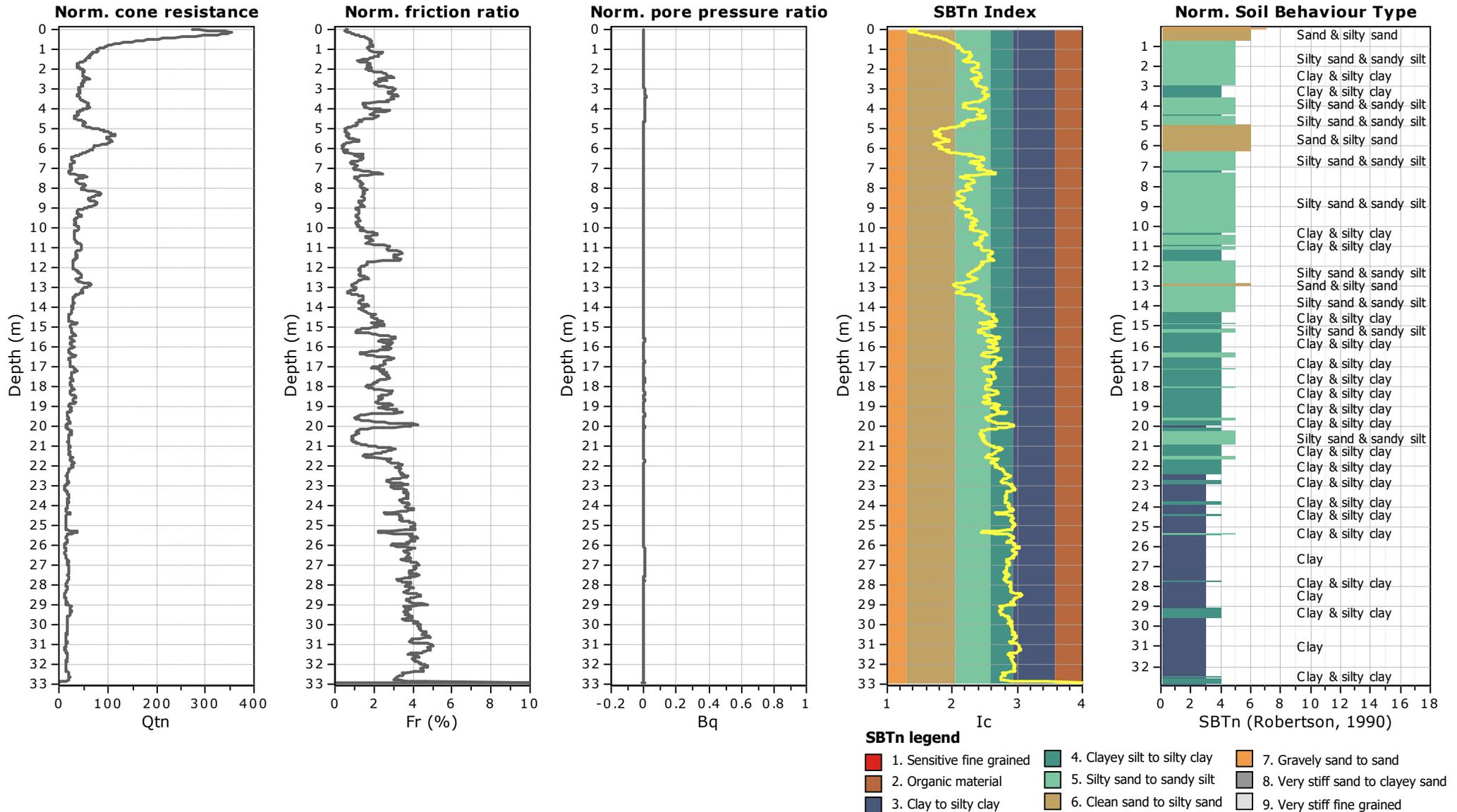


SBT - Bq plots (normalized)



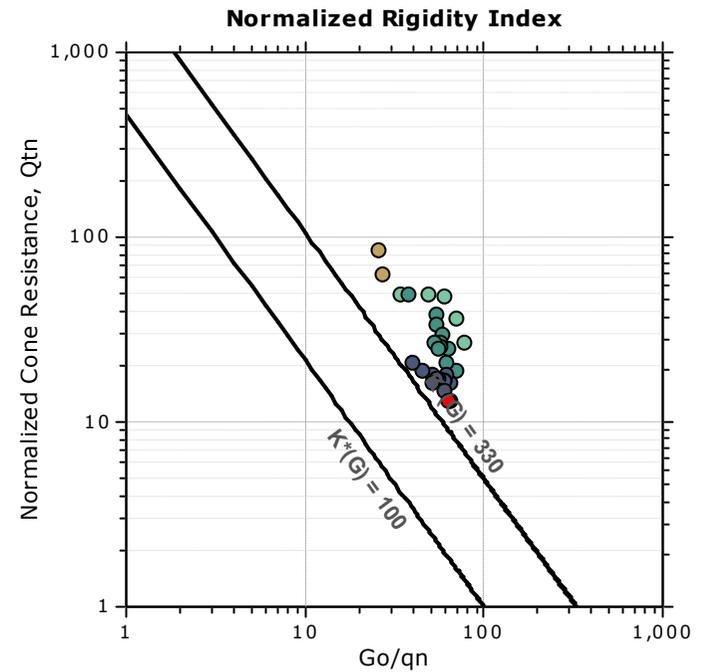
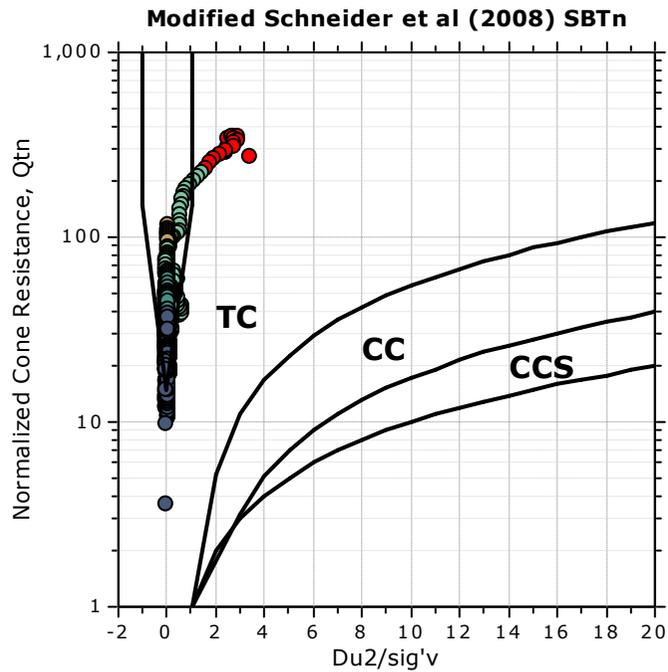
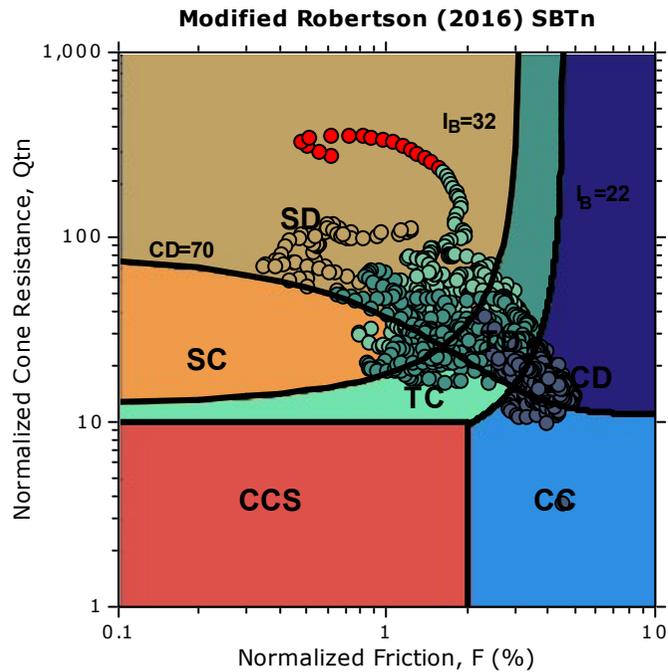
SBTn legend

- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |



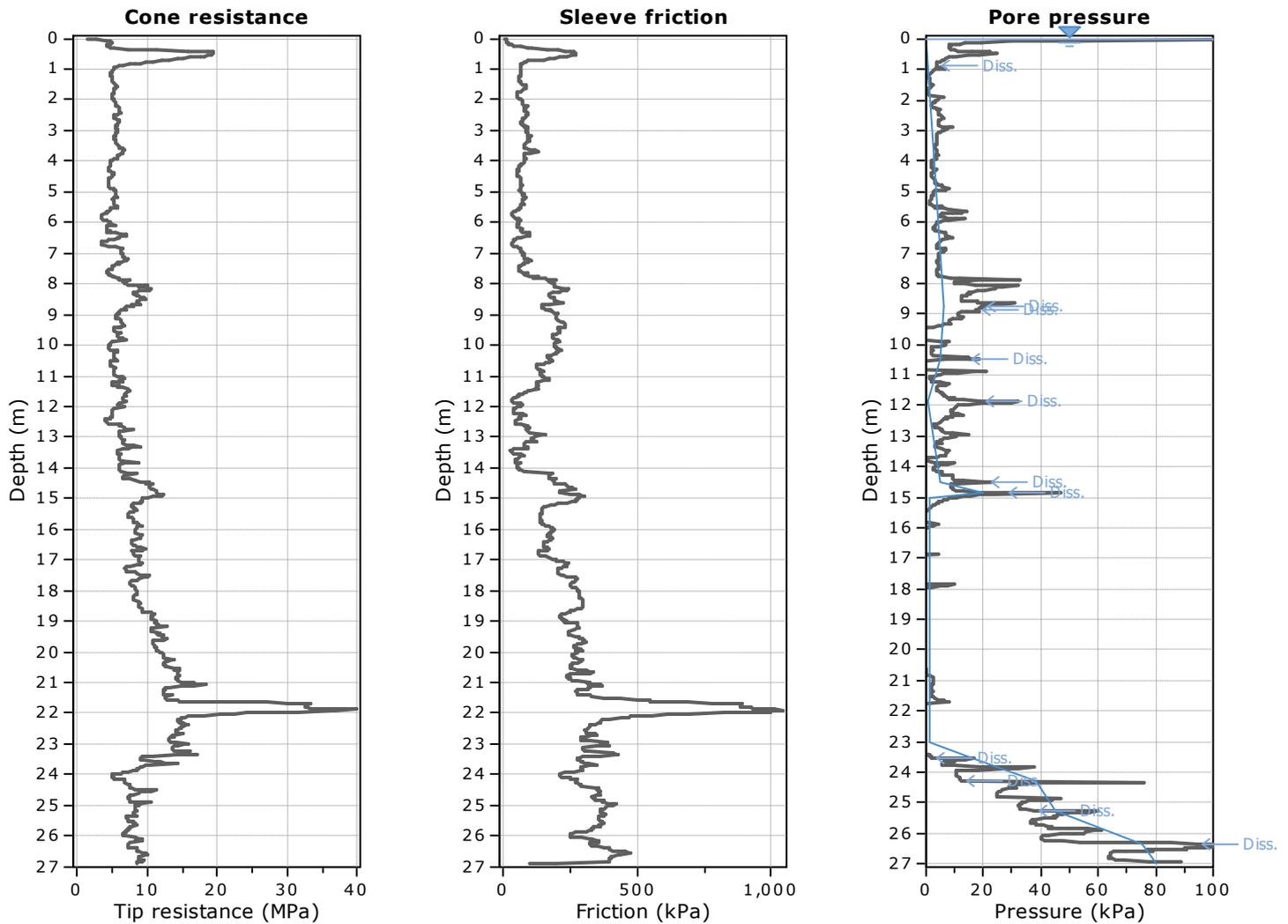


Updated SBTn plots

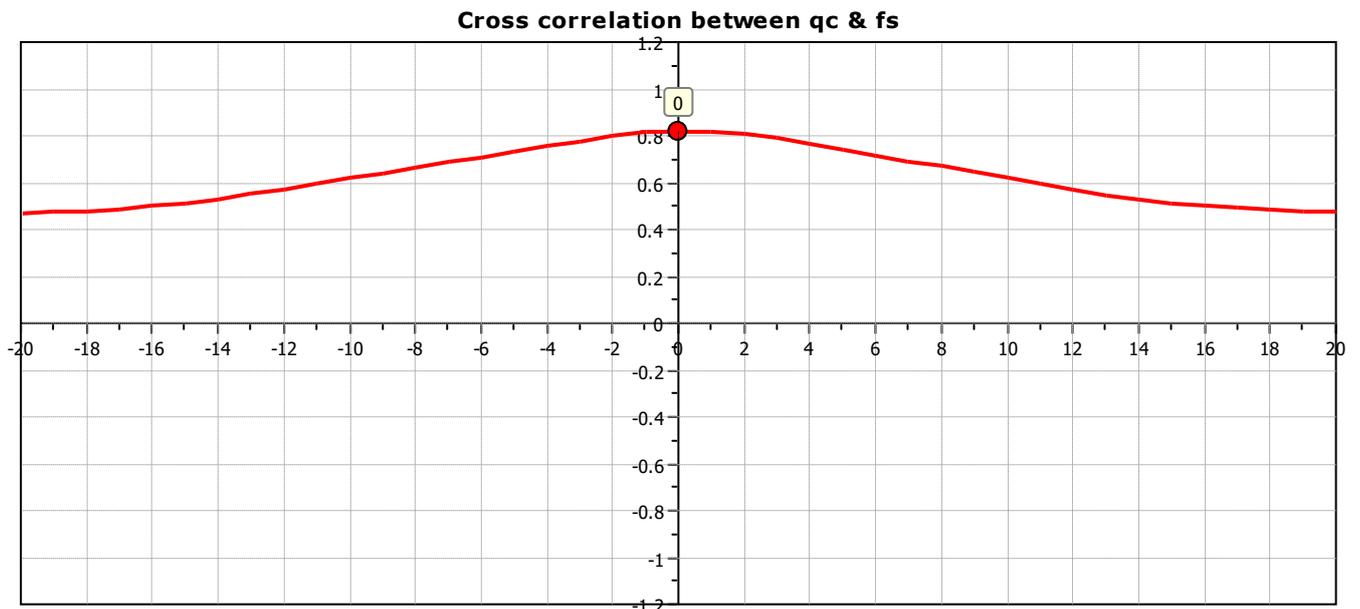


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K^*(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

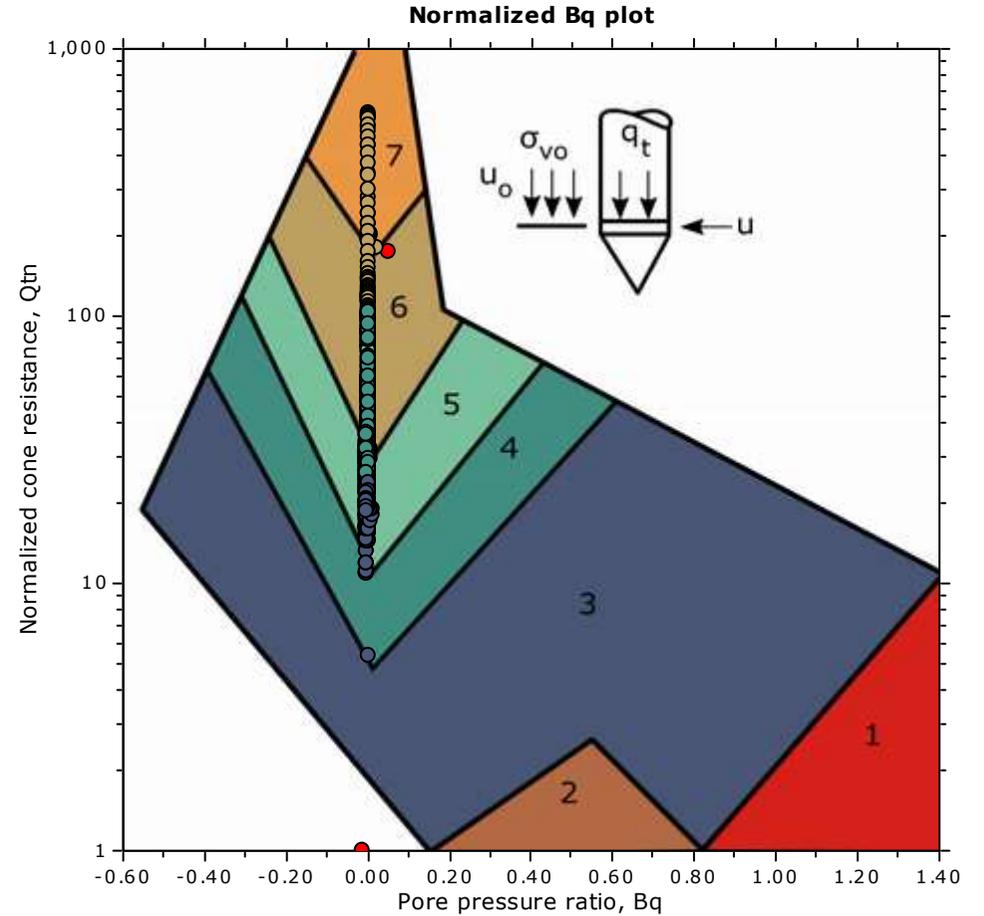
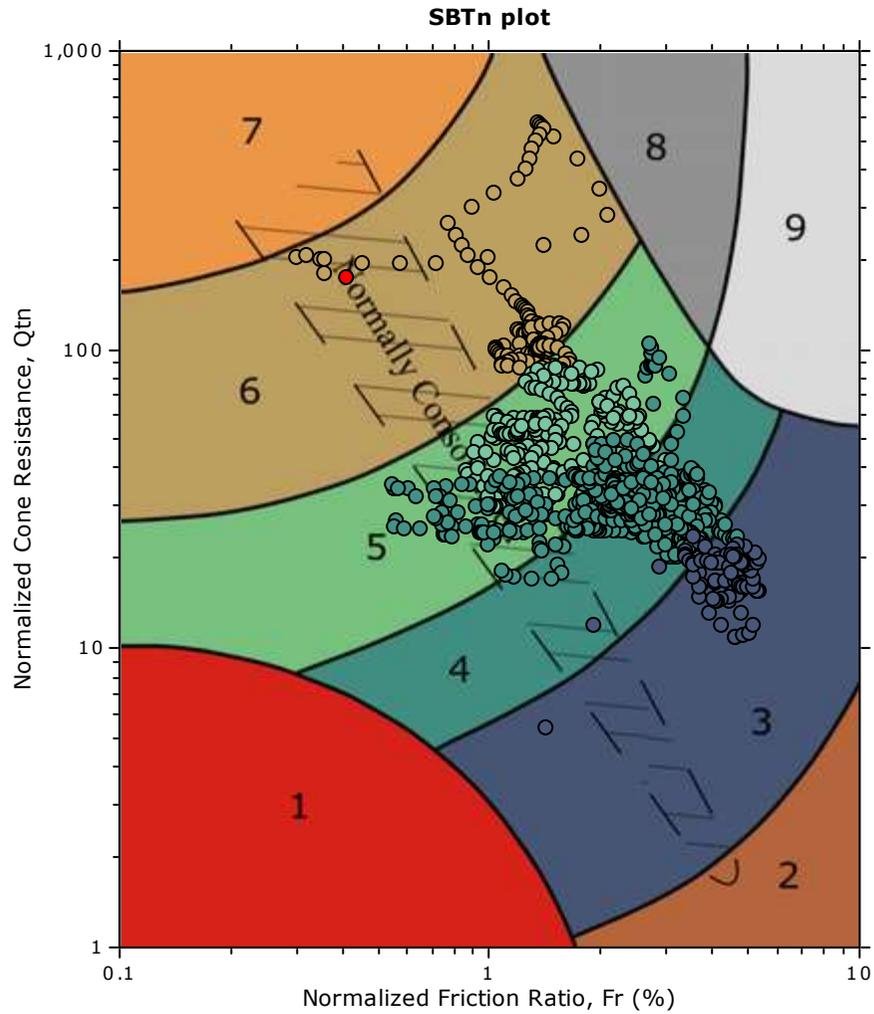


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



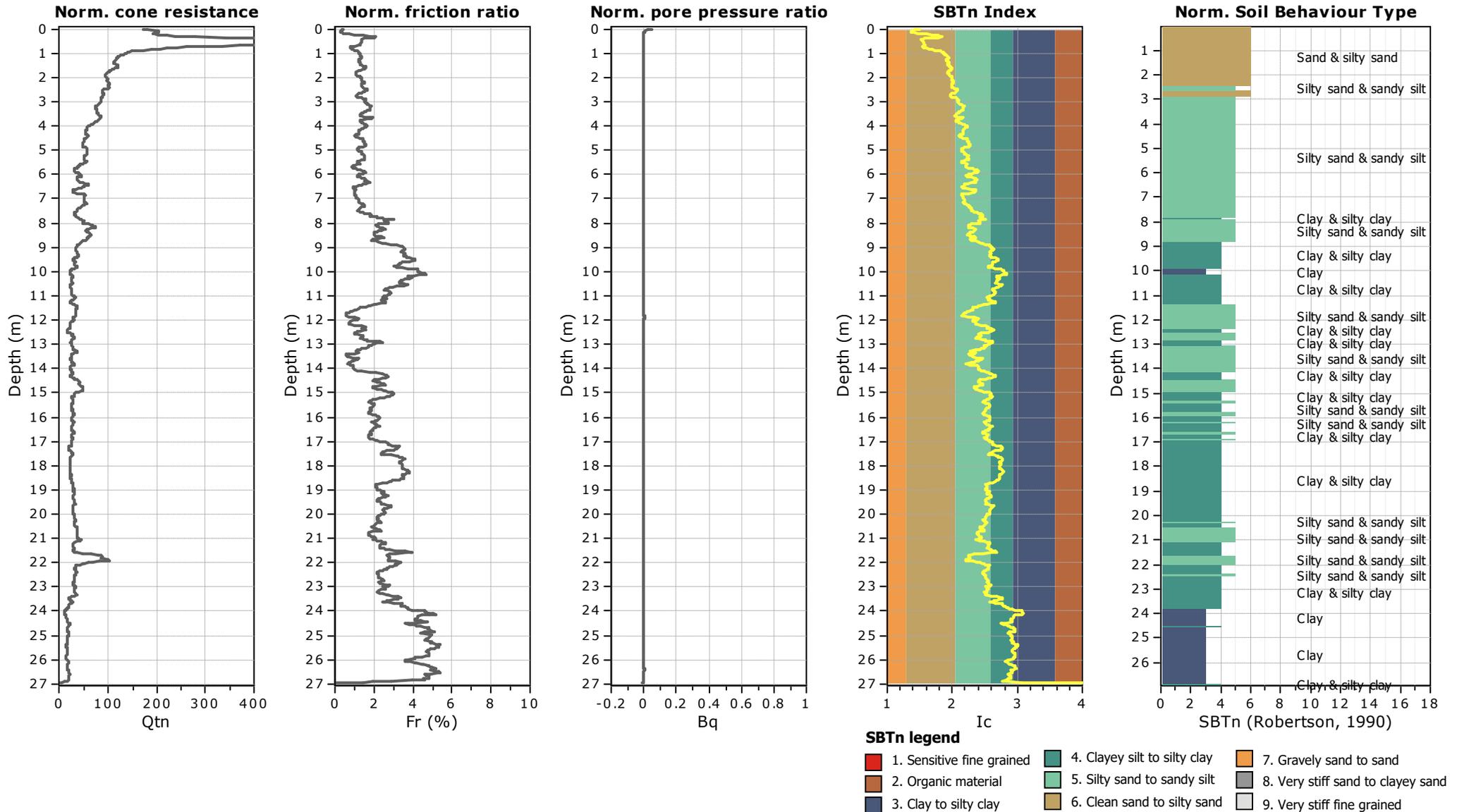


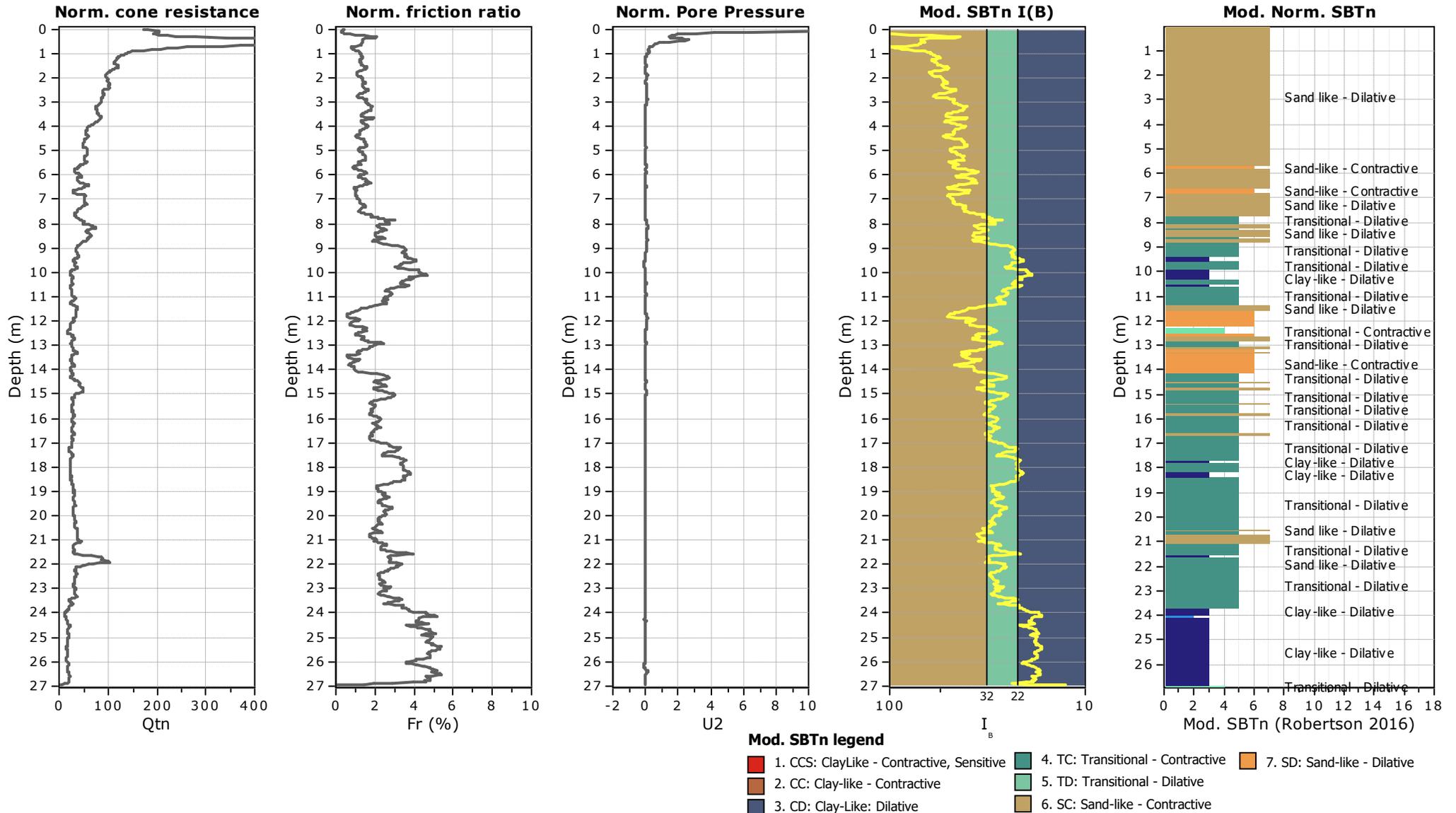
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

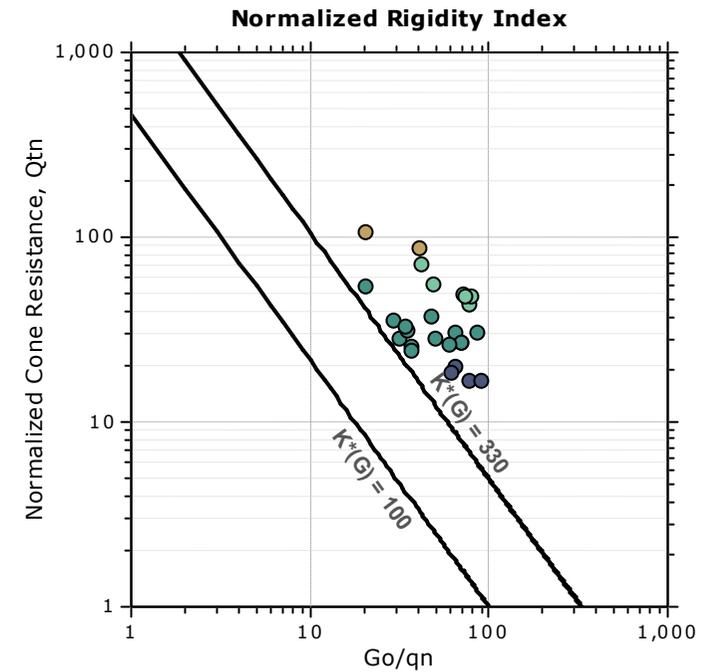
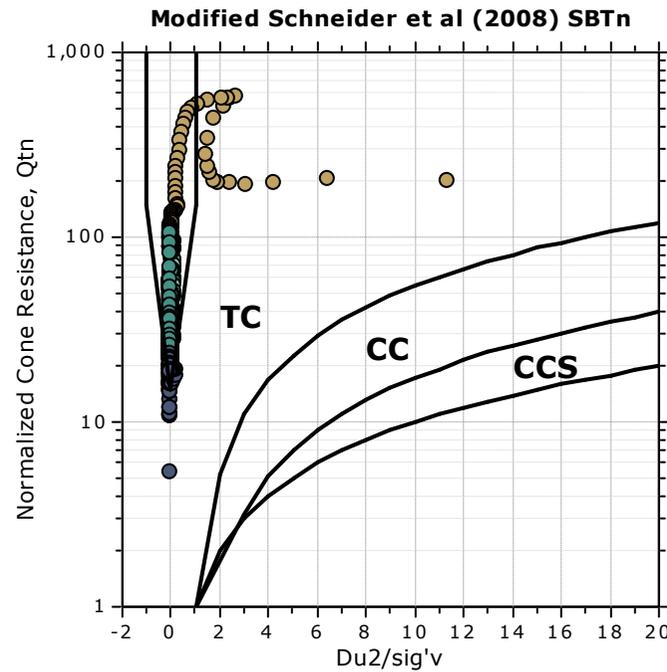
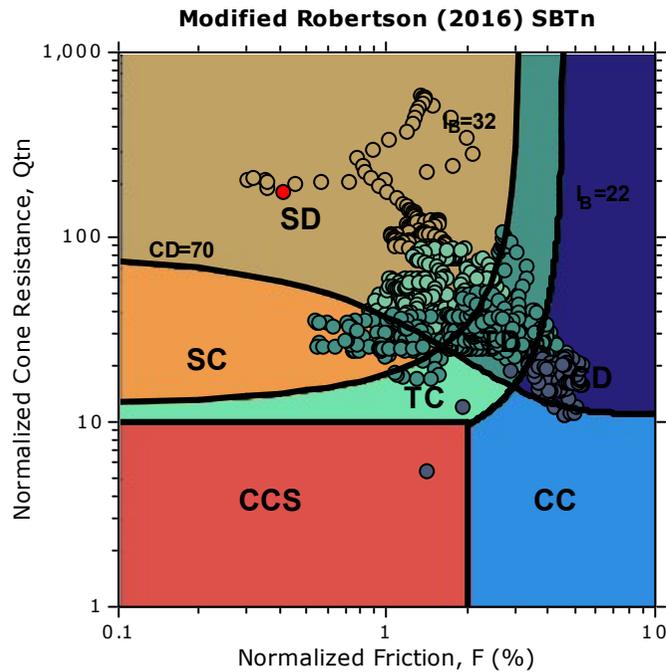
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





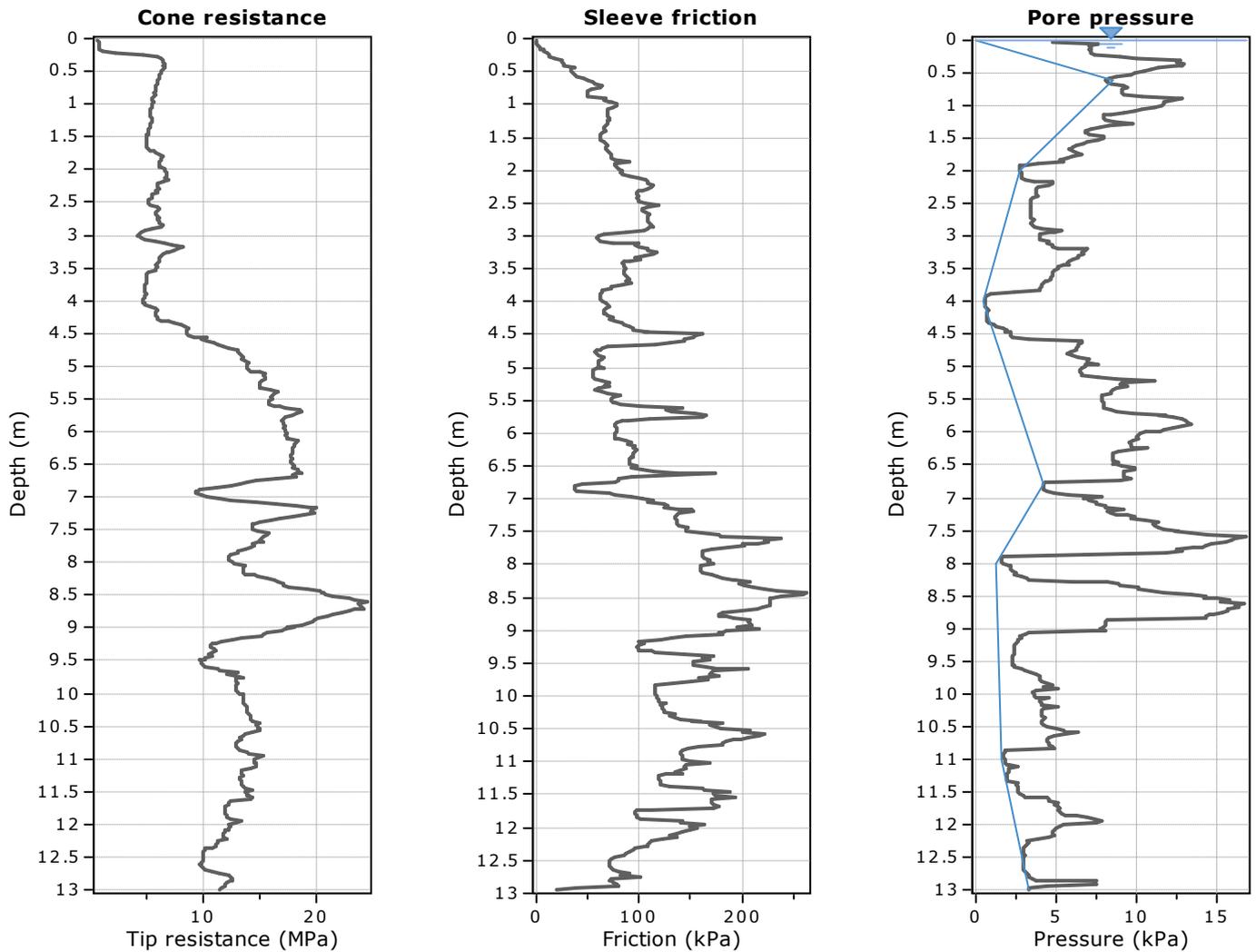


Updated SBTn plots

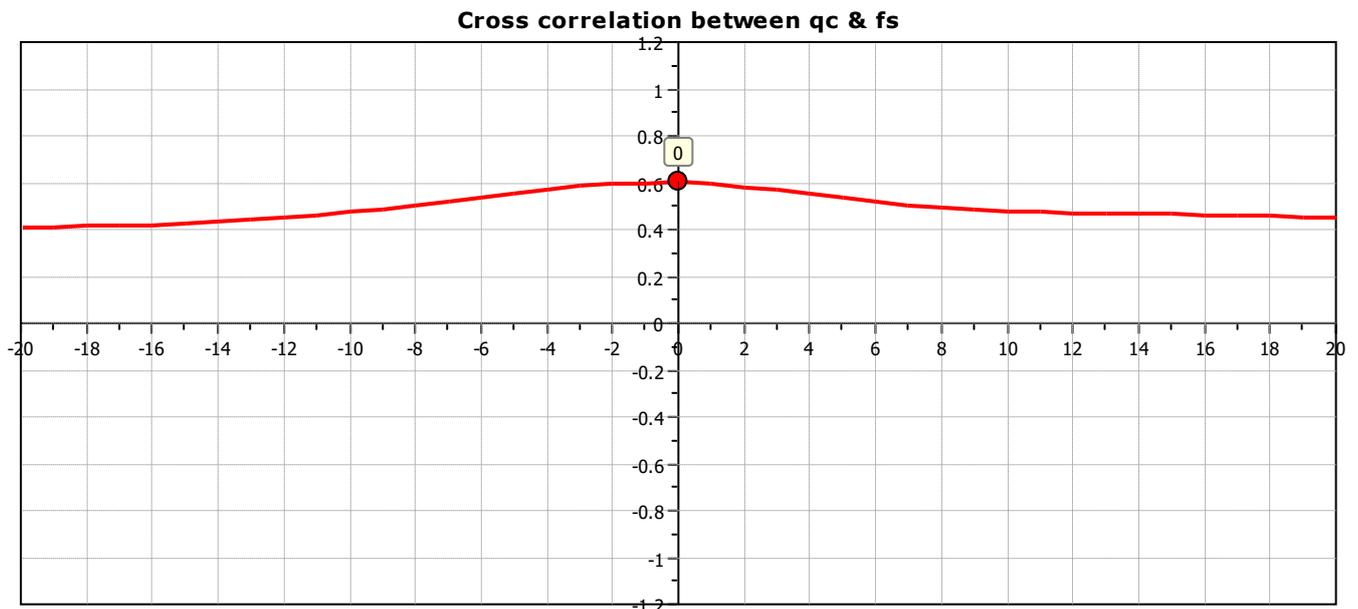


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K^*(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

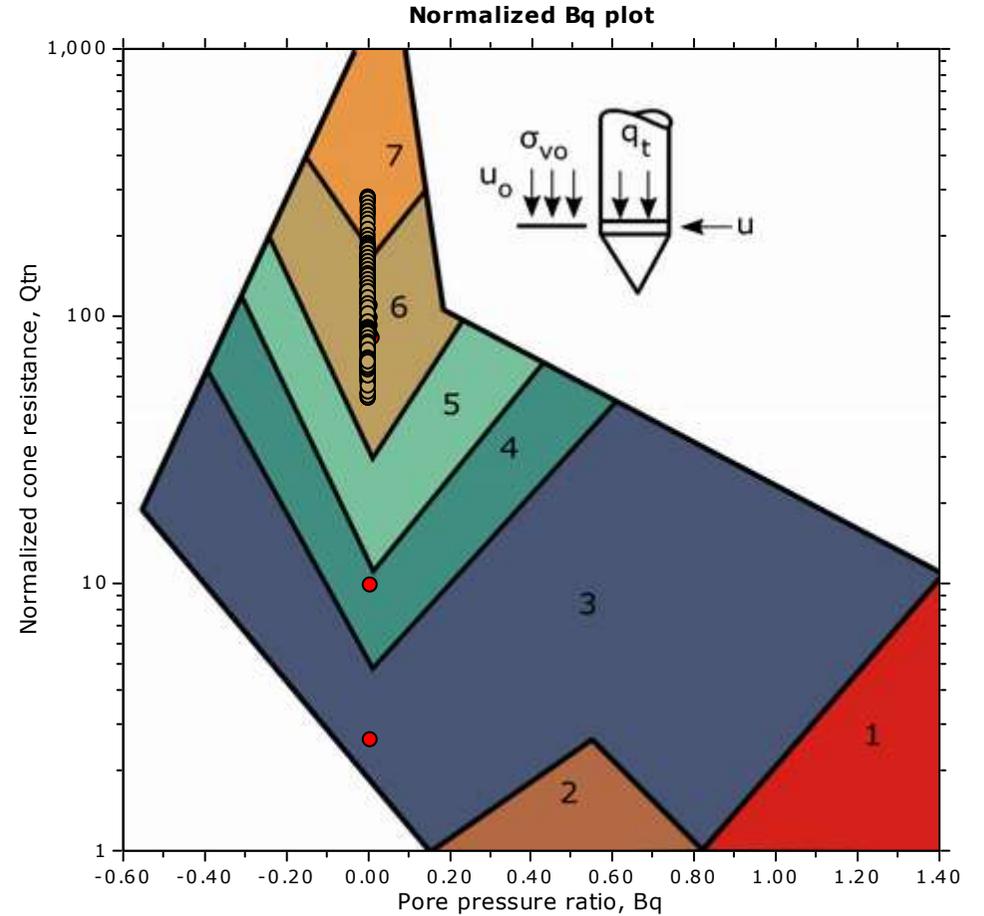
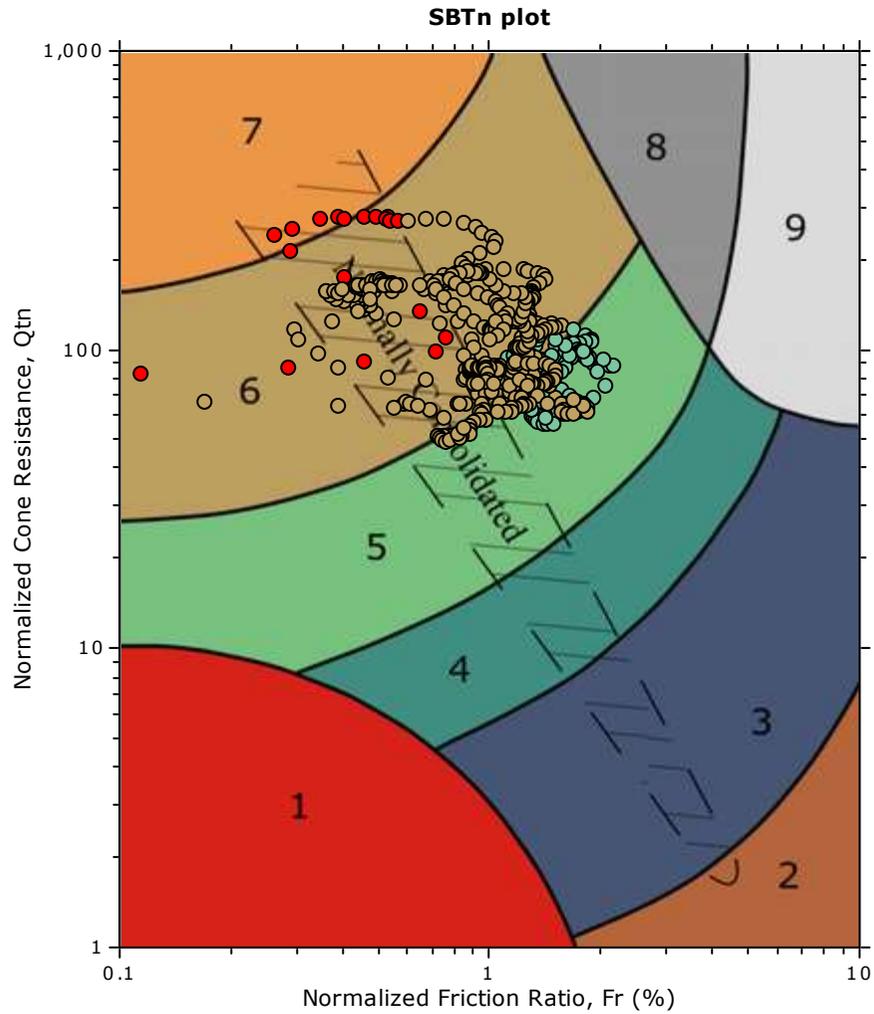


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



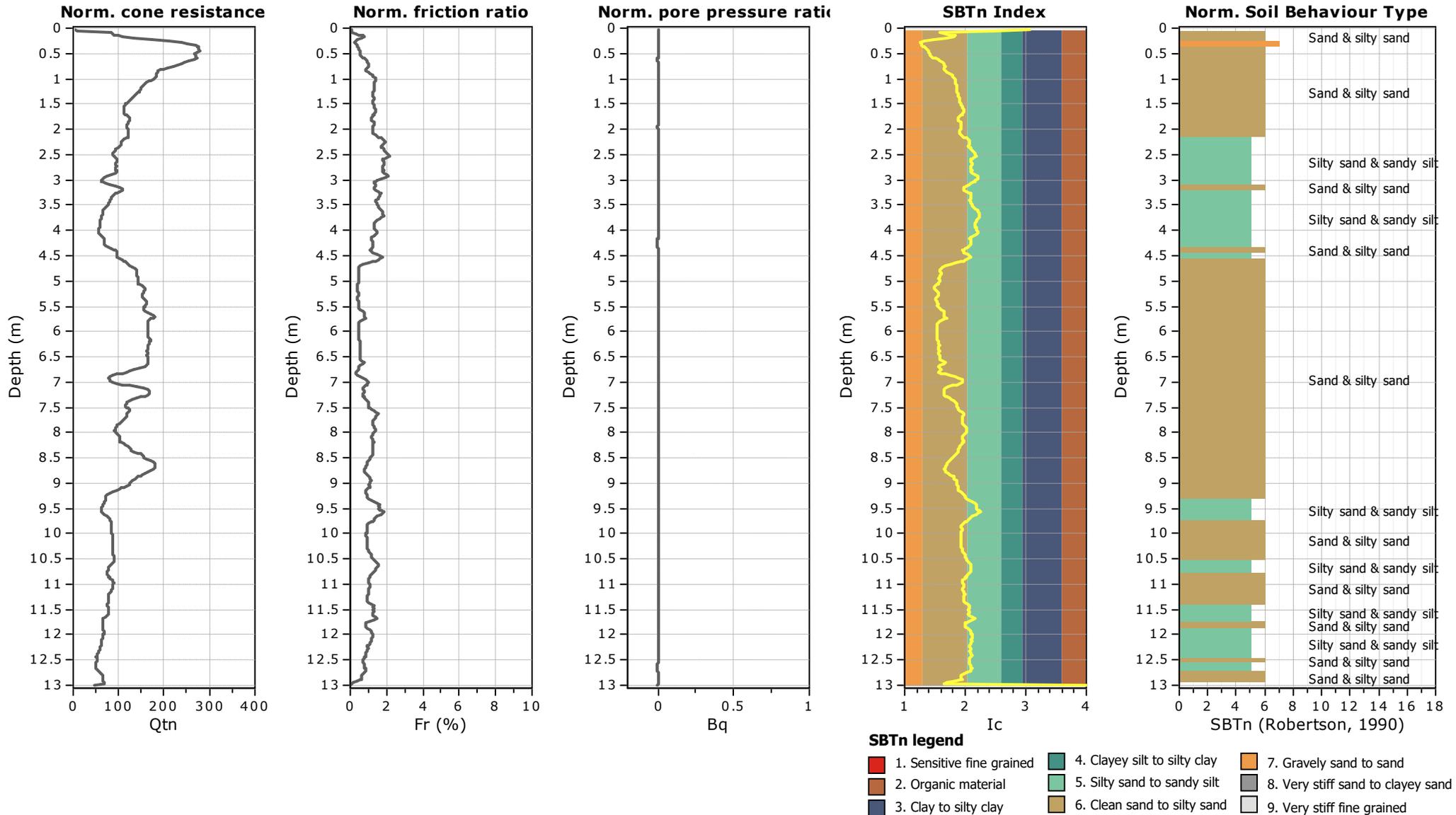


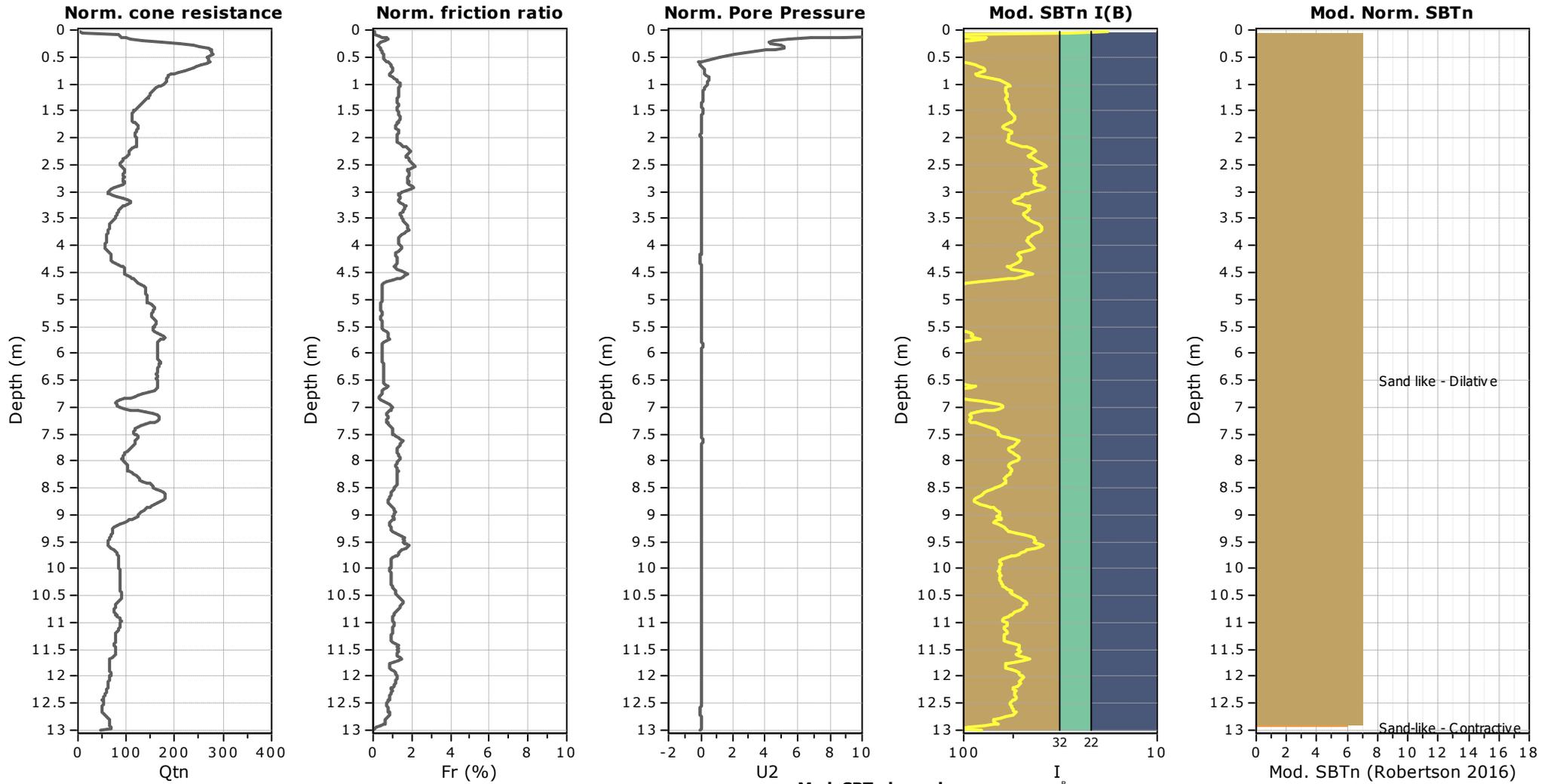
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

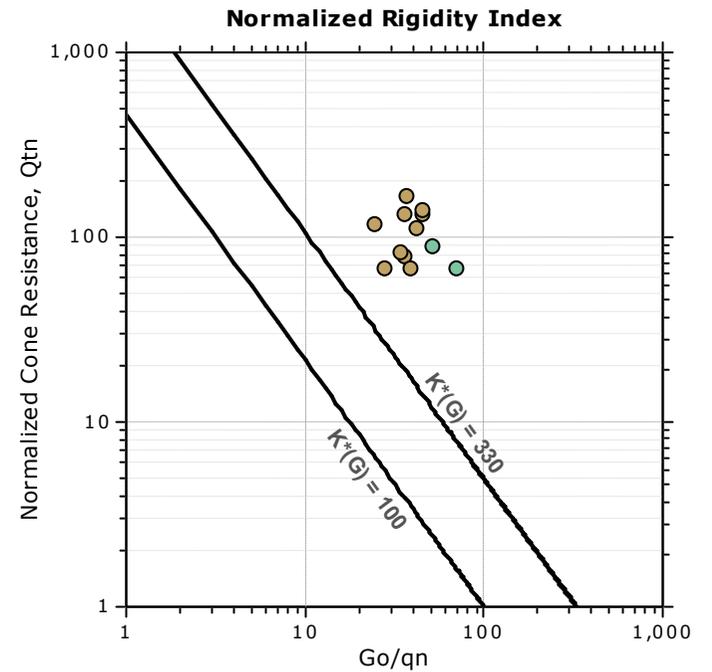
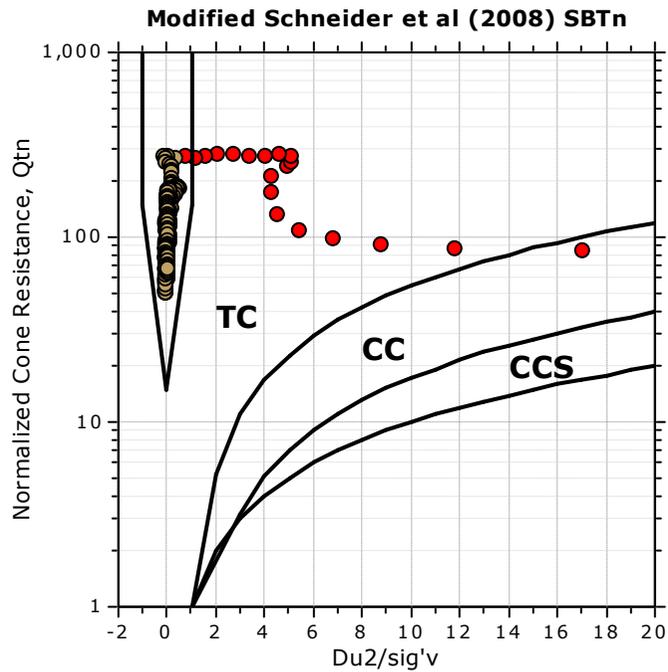
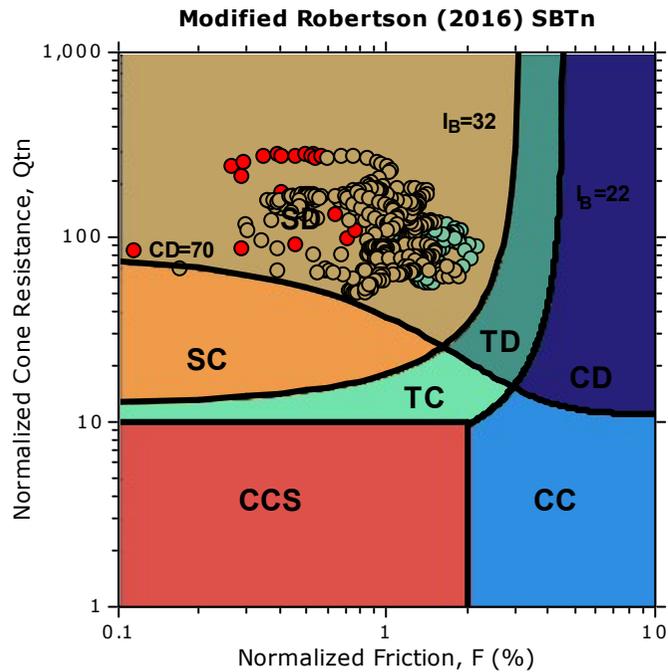
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





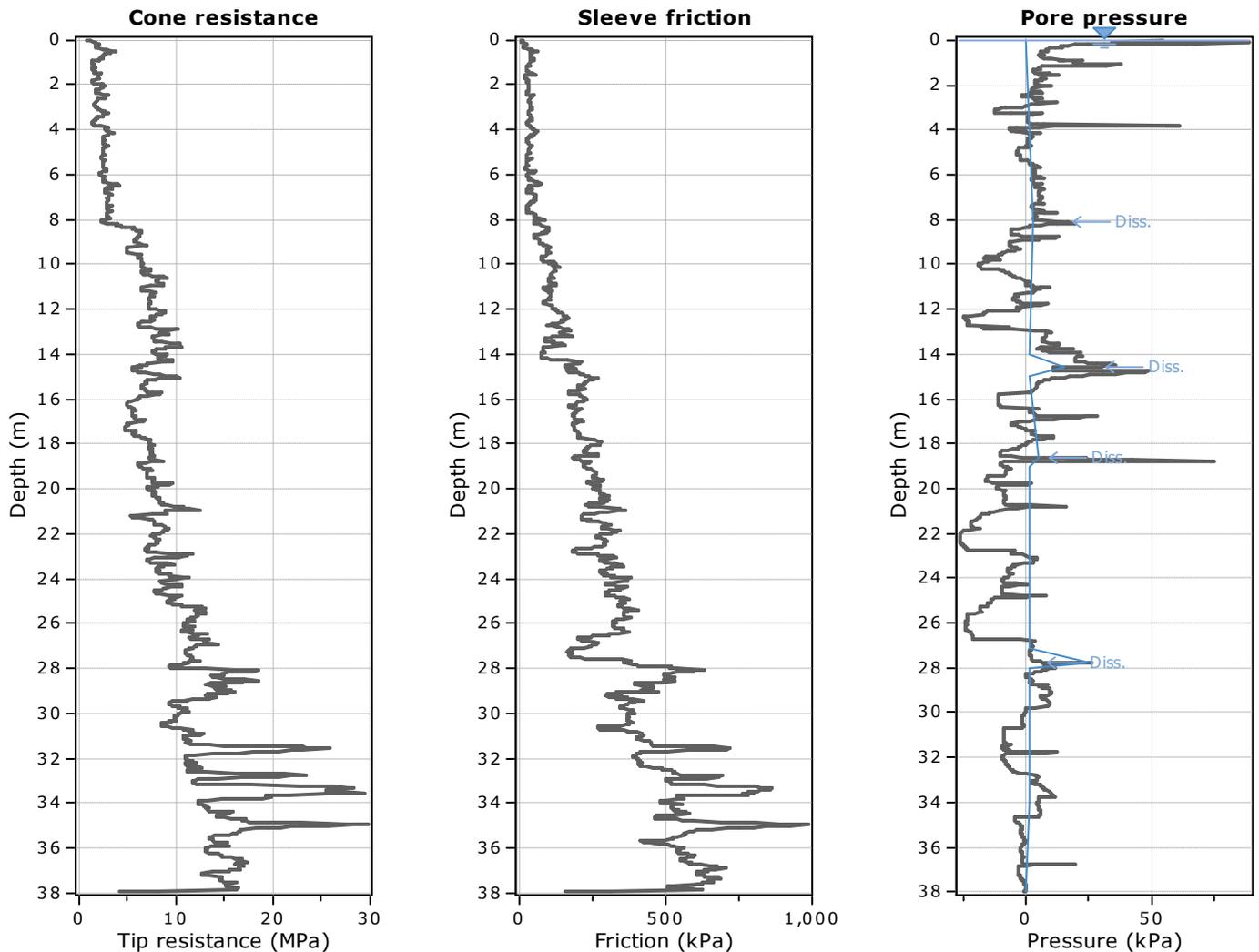


Updated SBTn plots

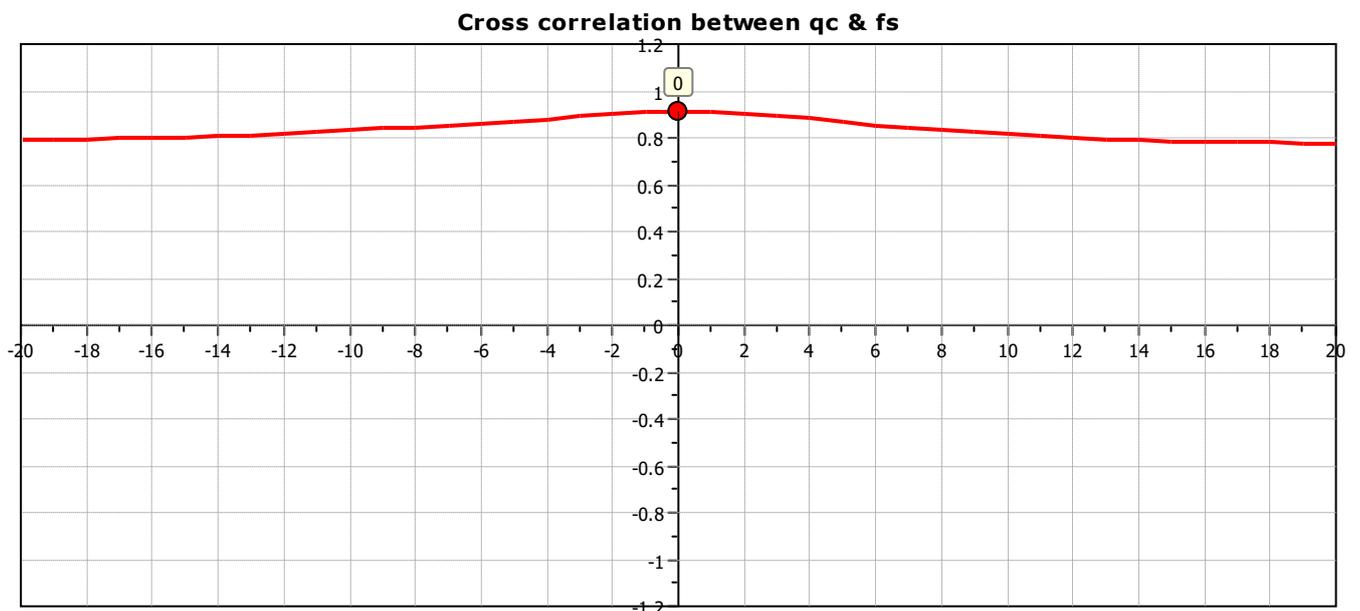


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

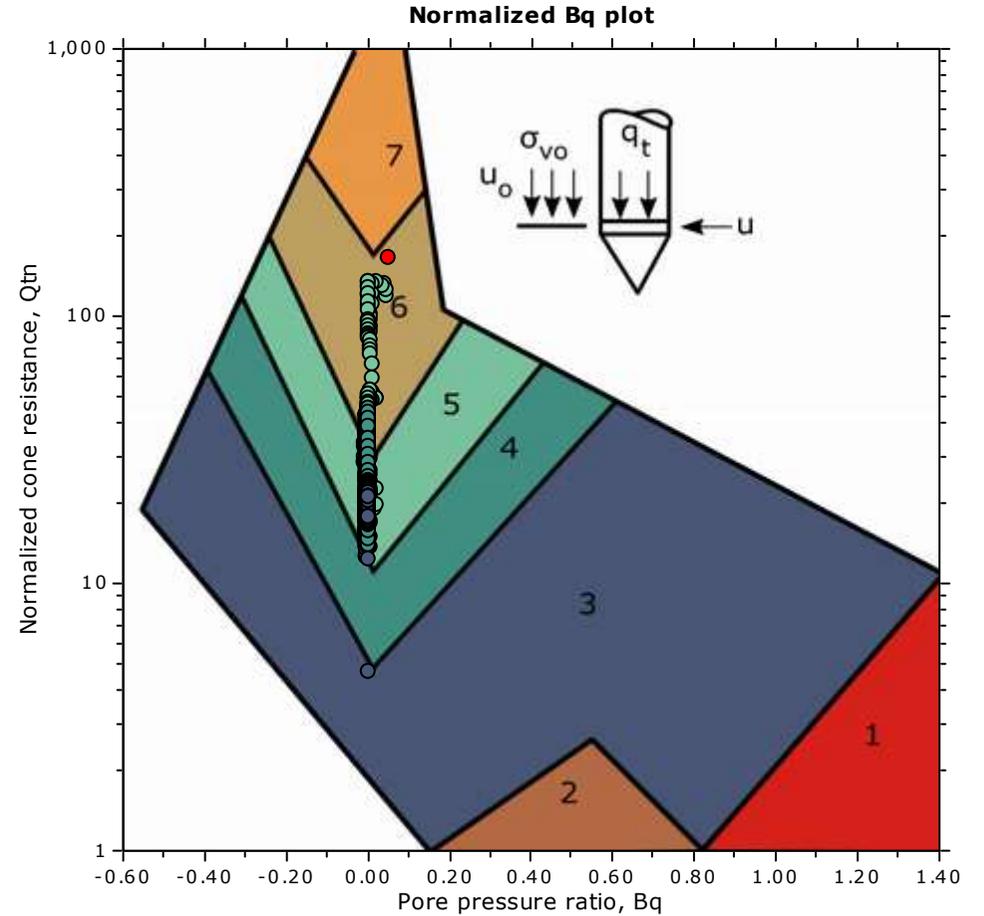
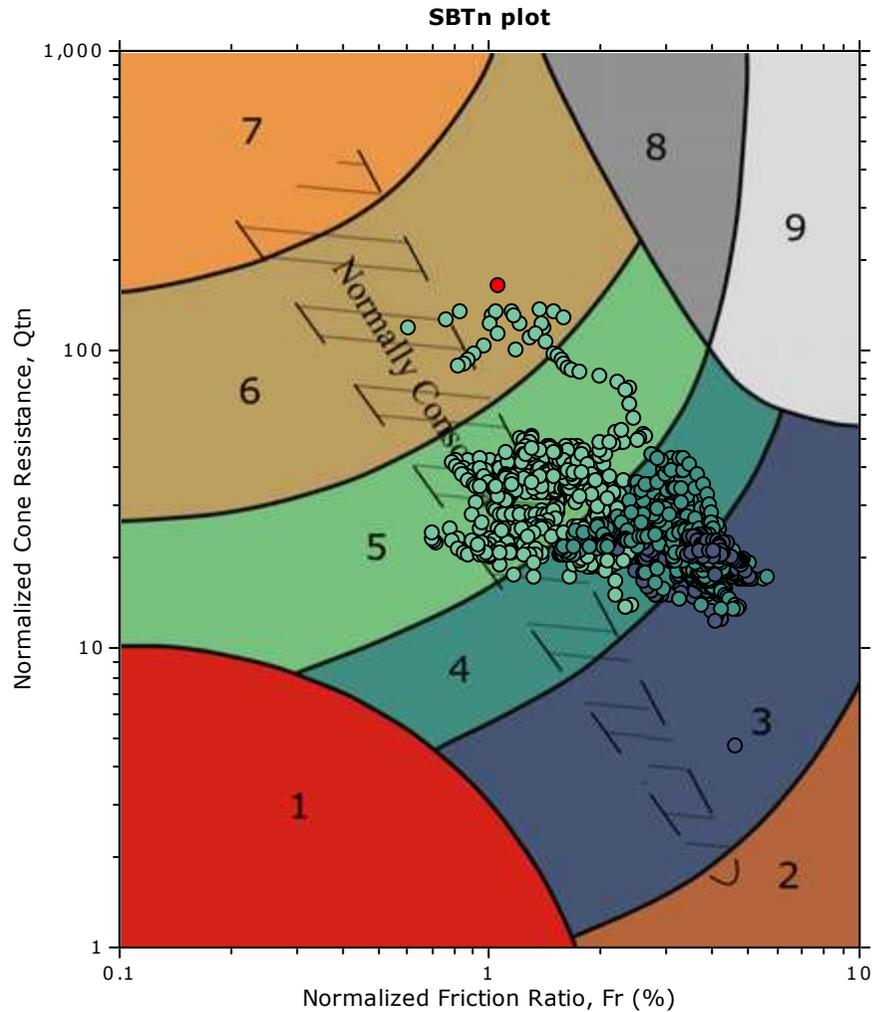


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



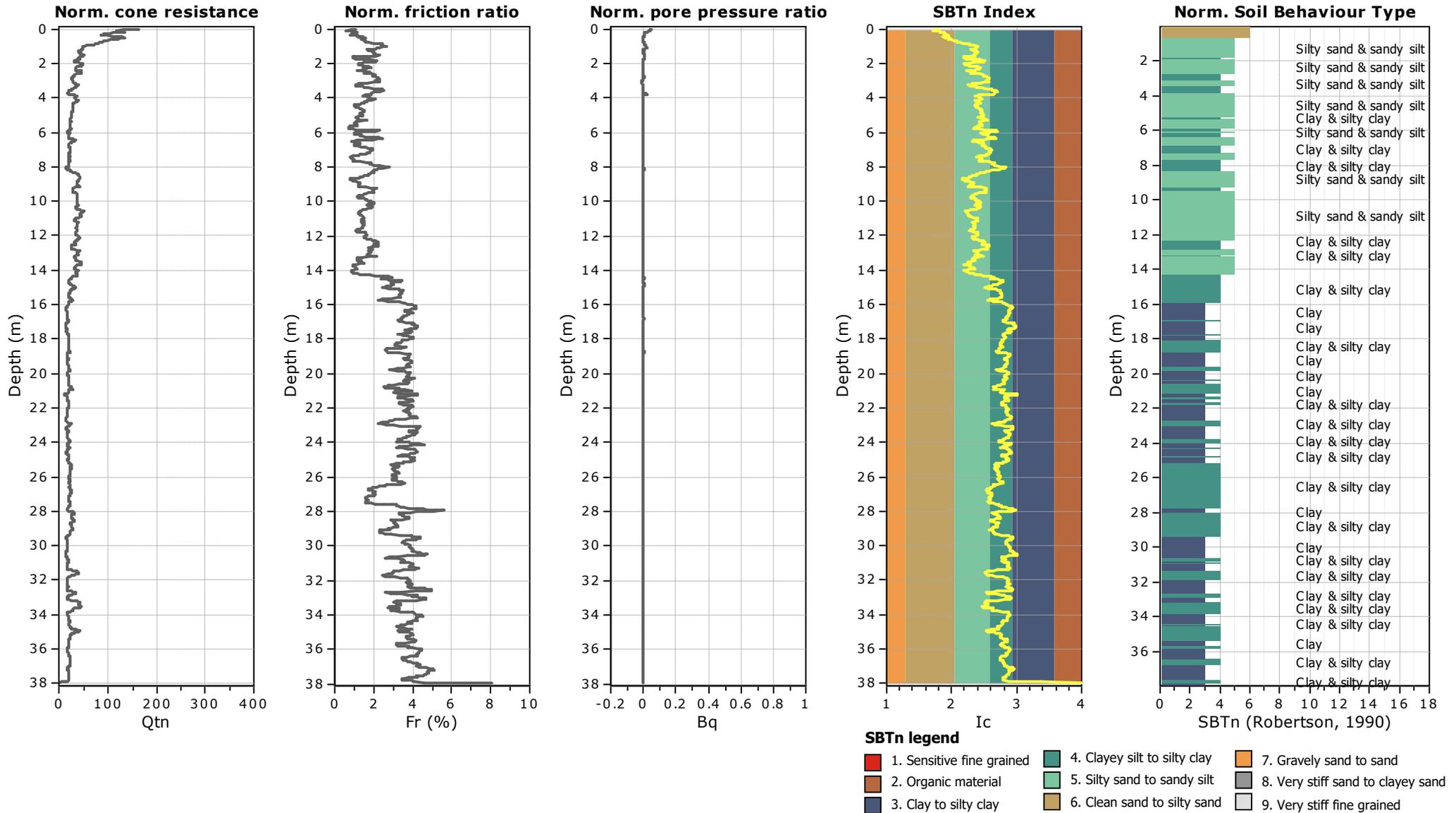


SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

Elaborado por: Gerson Urbina Lira

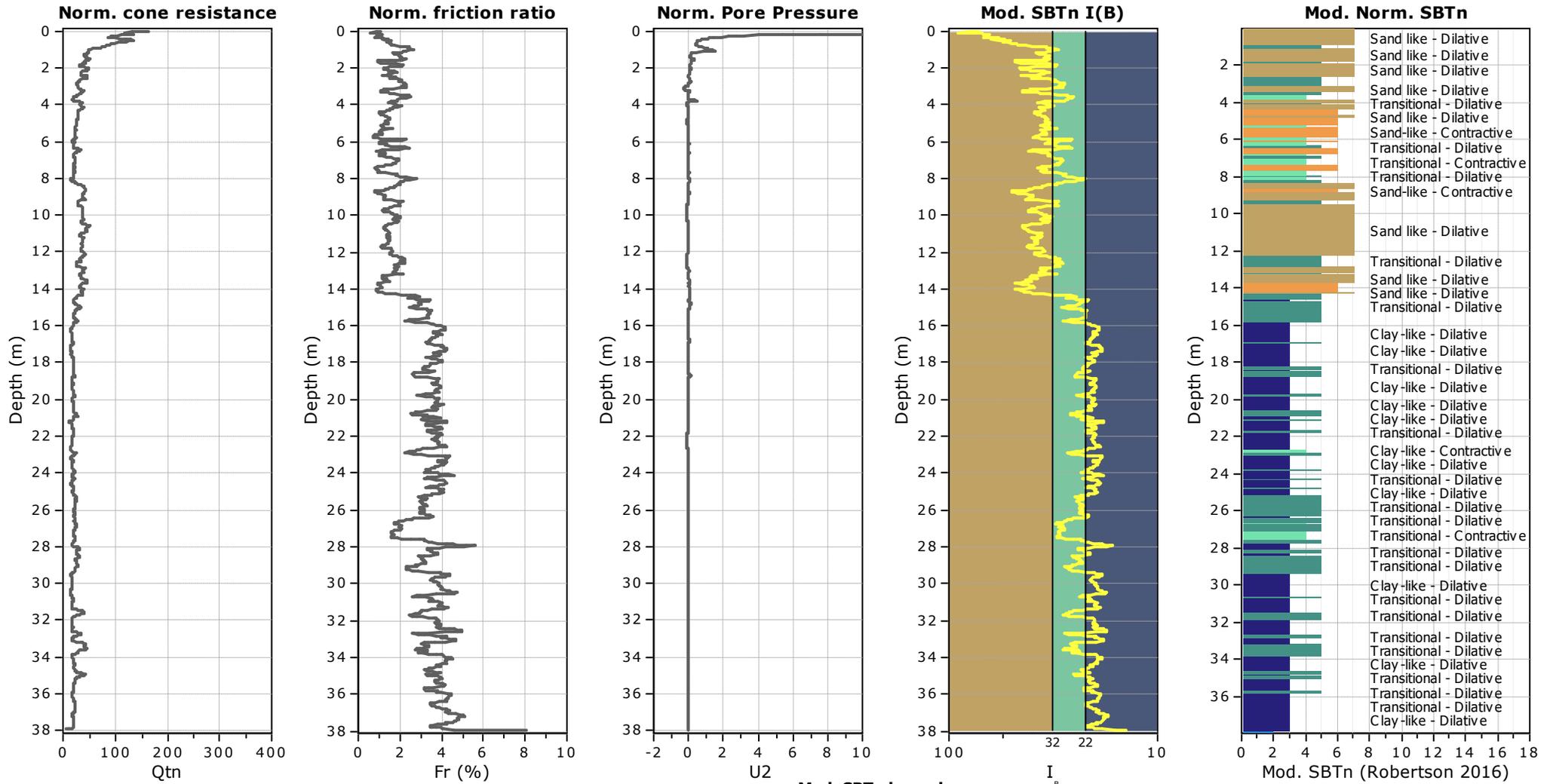
Asesor: M.Sc. Ing. Denys Parra Murrugarra

Project: Aplicación del SCPTu en la estabilidad de taludes postsismo de una pila de lixiviación

Location: Lima - Perú

CPT: SCPTu-04

Total depth: 38 m

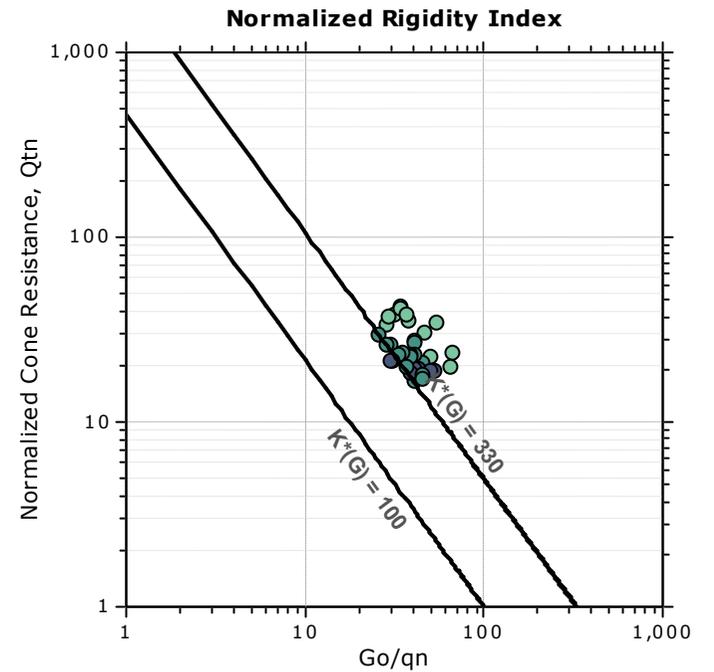
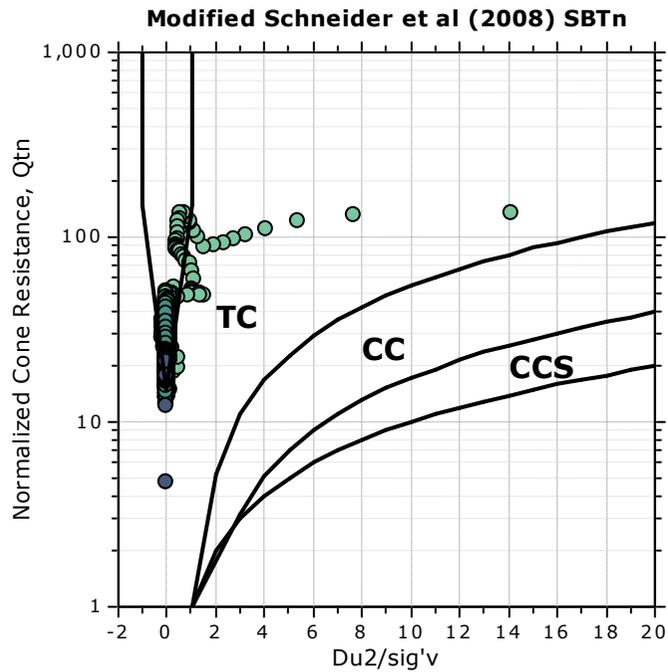
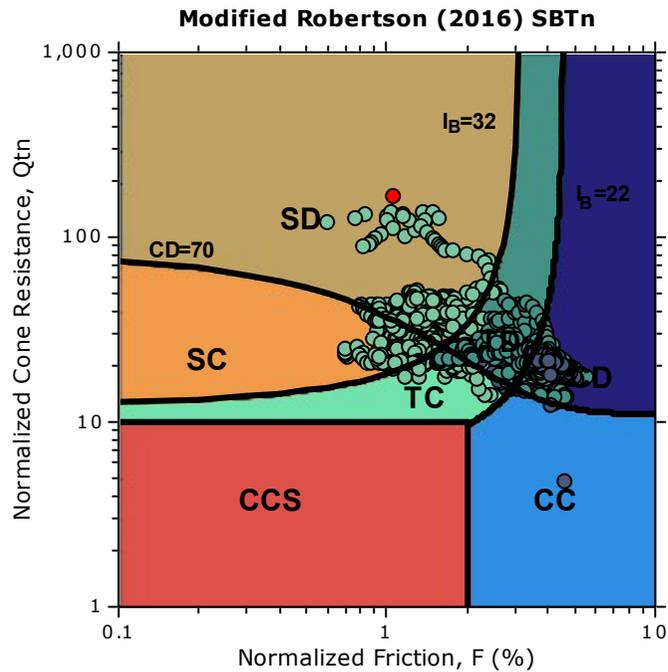


Mod. SBTn legend

- | | | |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. CCS: ClayLike - Contractive, Sensitive | 4. TC: Transitional - Contractive | 7. SD: Sand-like - Dilative |
| 2. CC: Clay-like - Contractive | 5. TD: Transitional - Dilative | |
| 3. CD: Clay-Like: Dilative | 6. SC: Sand-like - Contractive | |

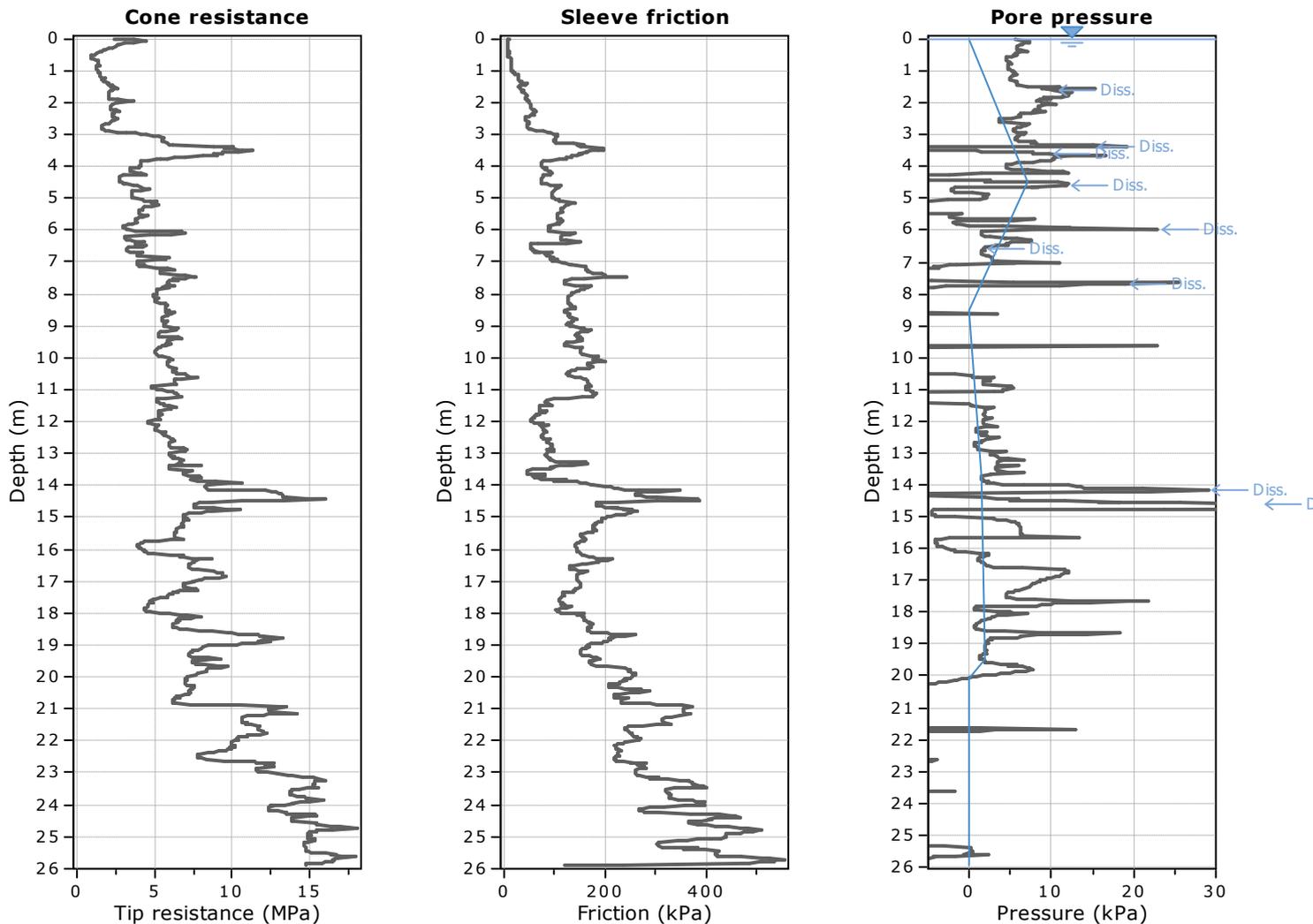


Updated SBTn plots

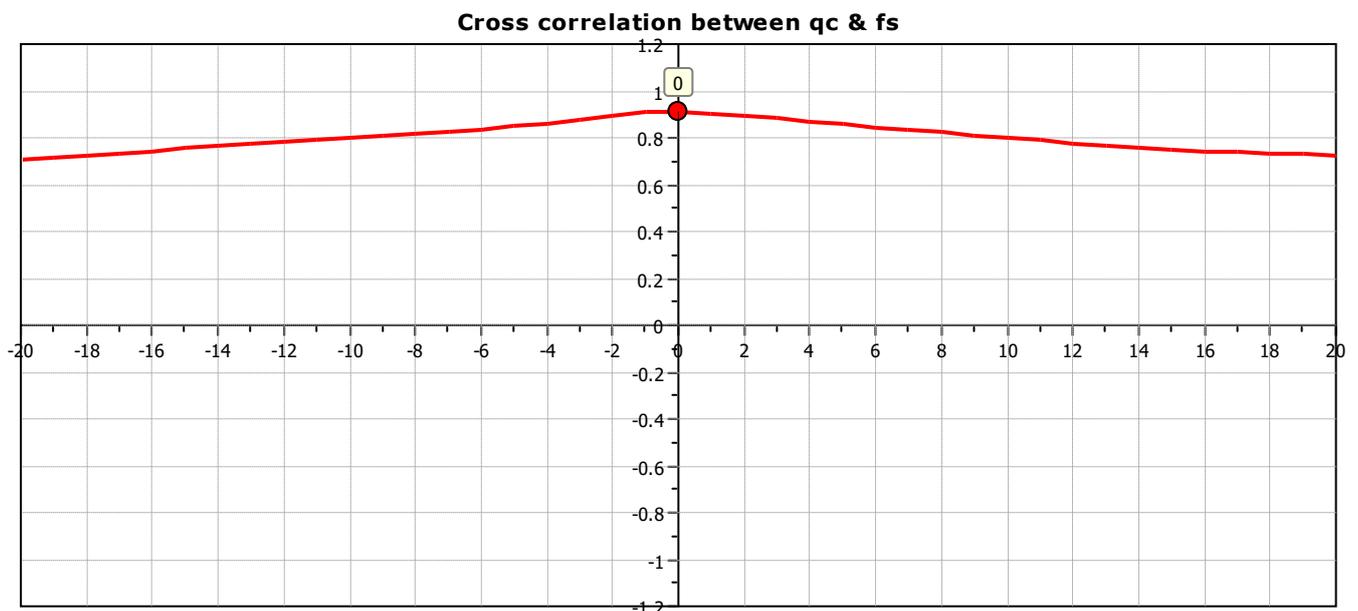


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K^*(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

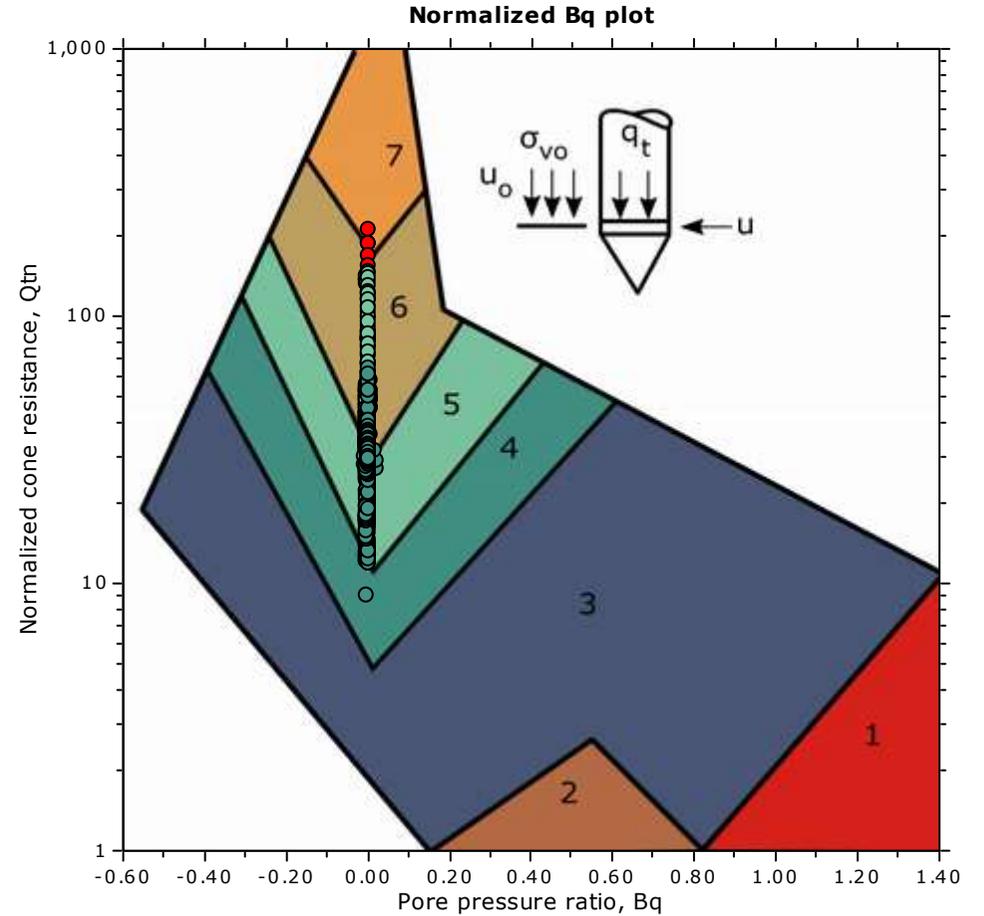
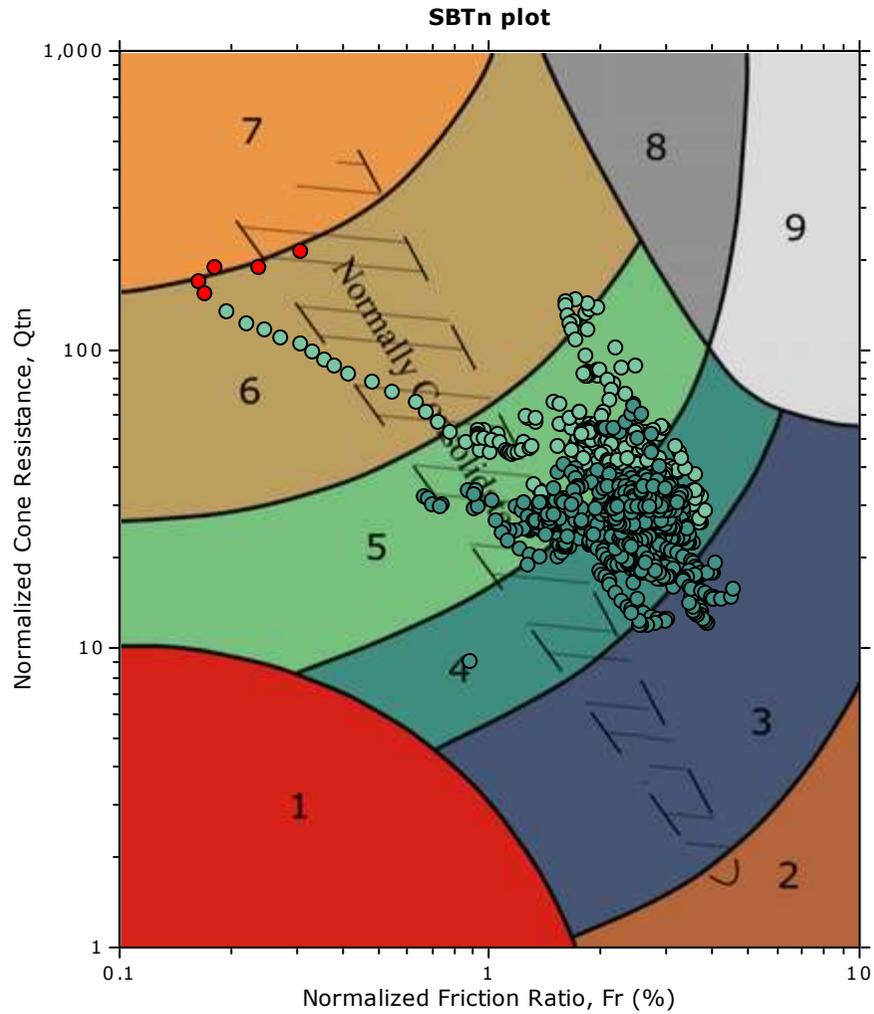


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



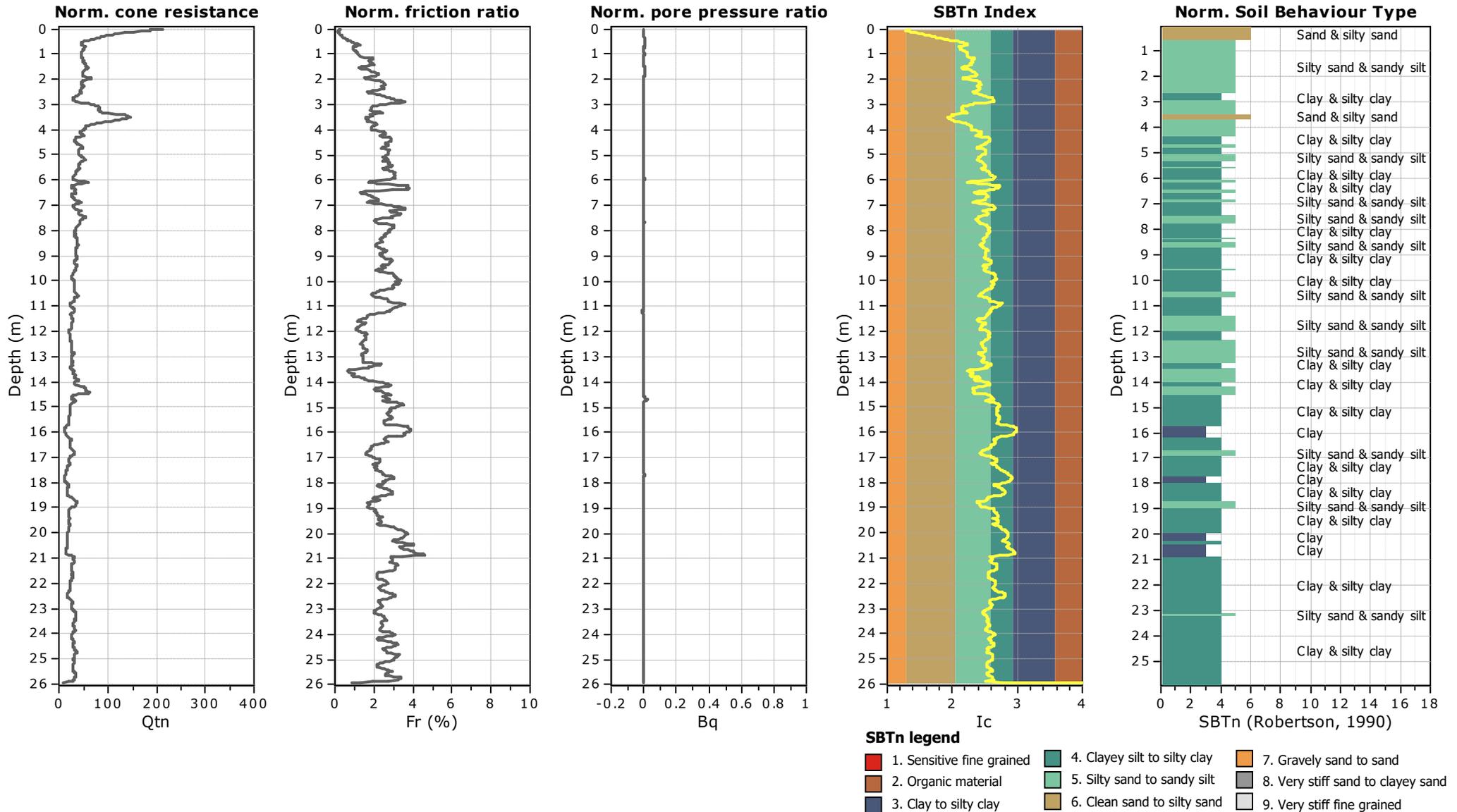


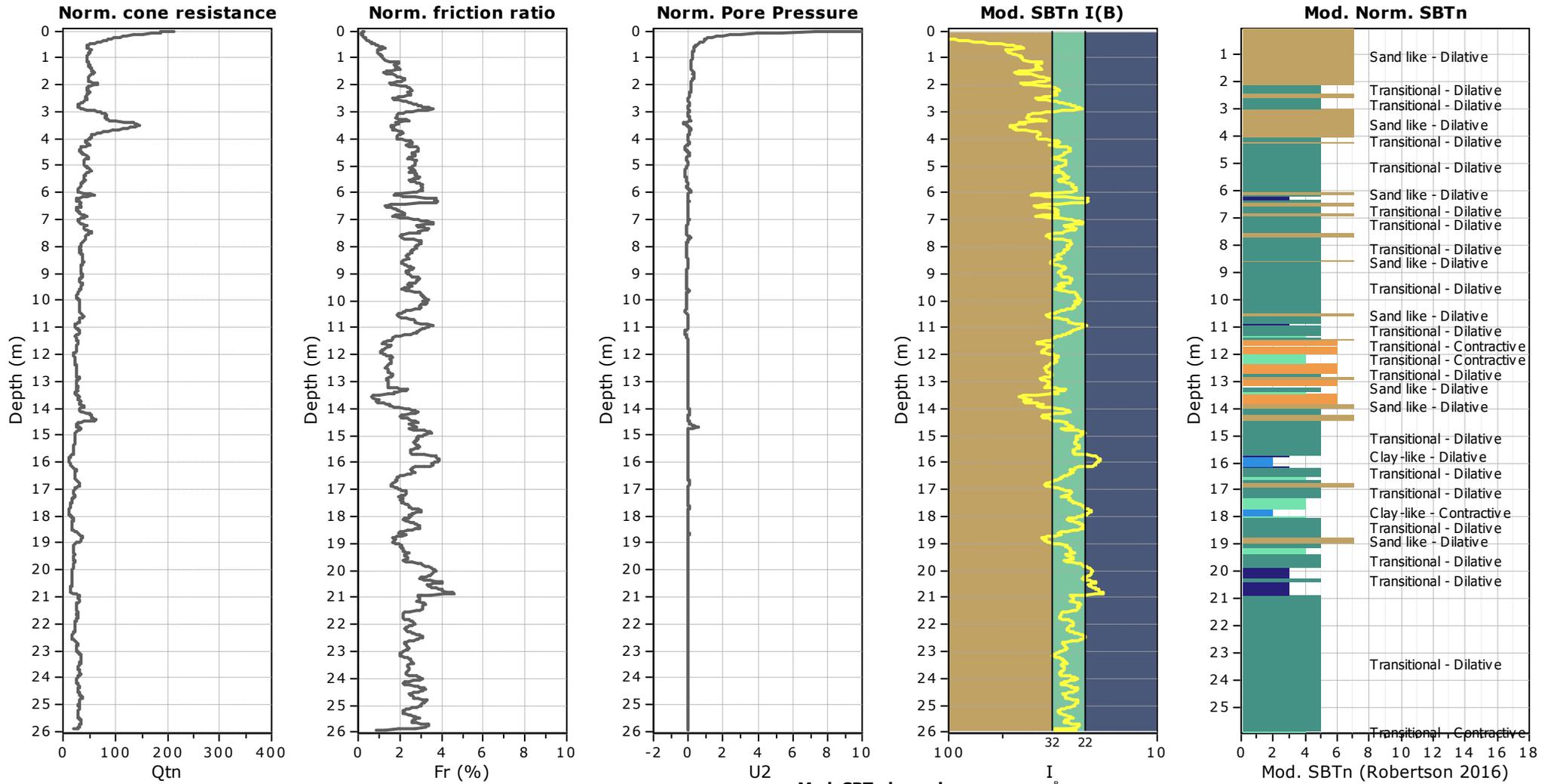
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

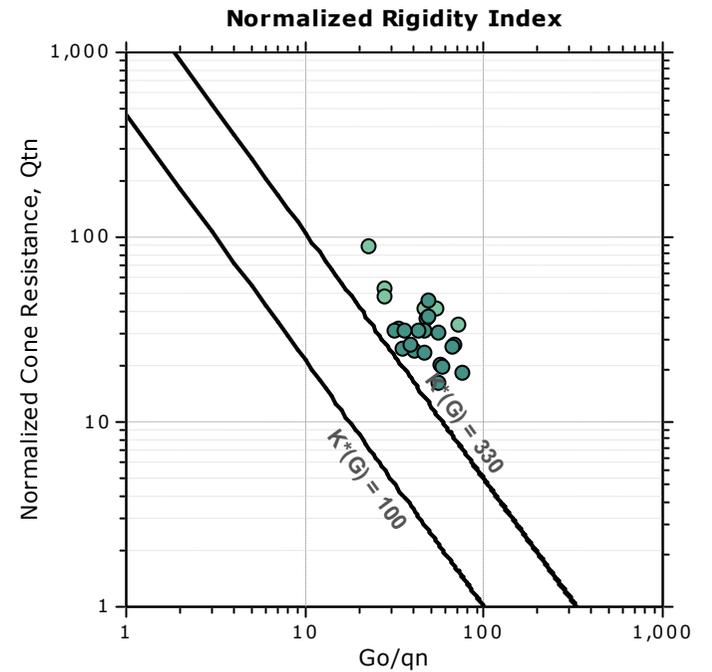
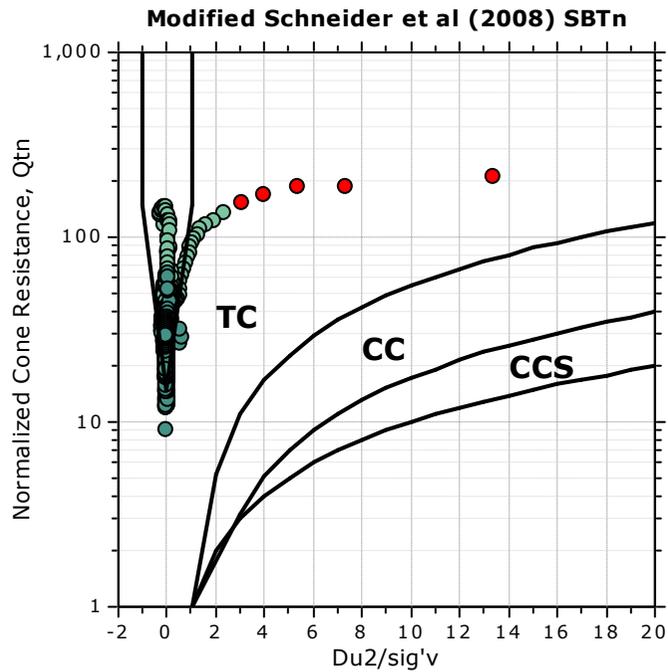
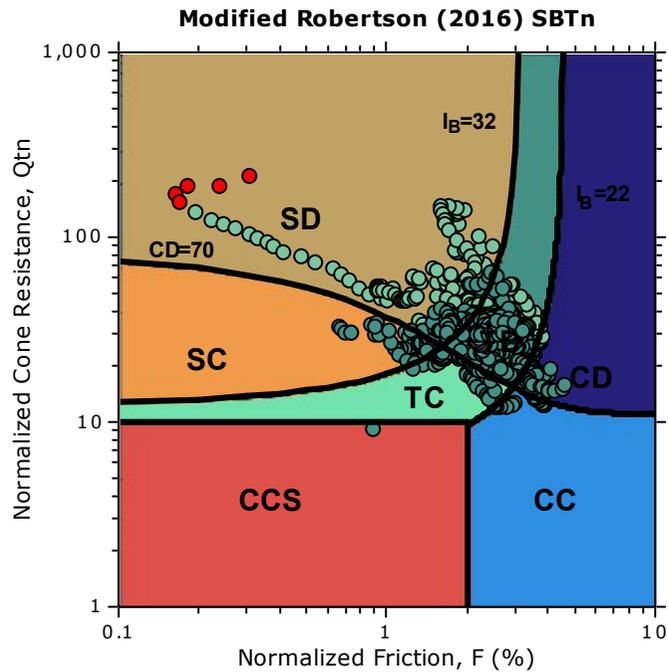
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





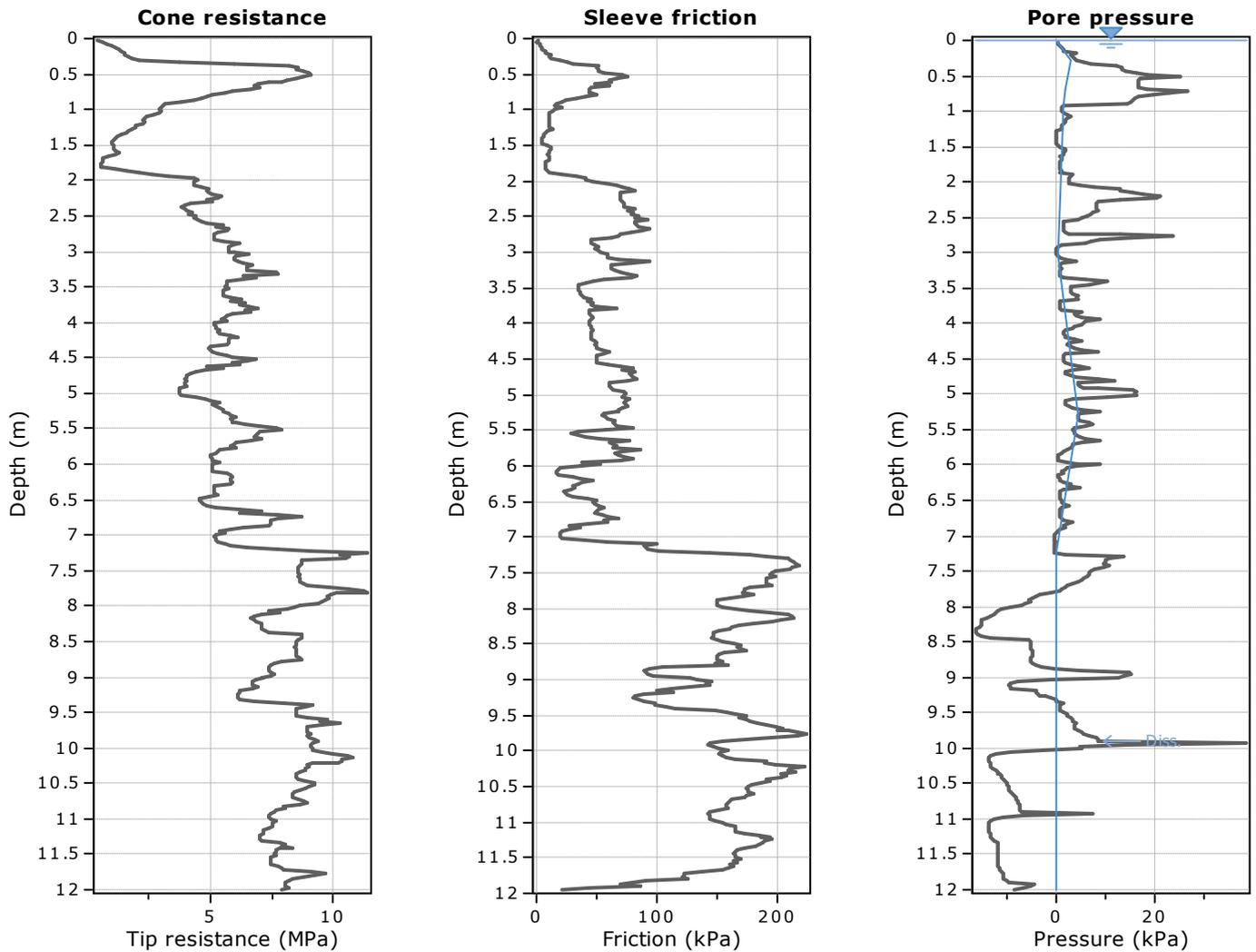


Updated SBTn plots

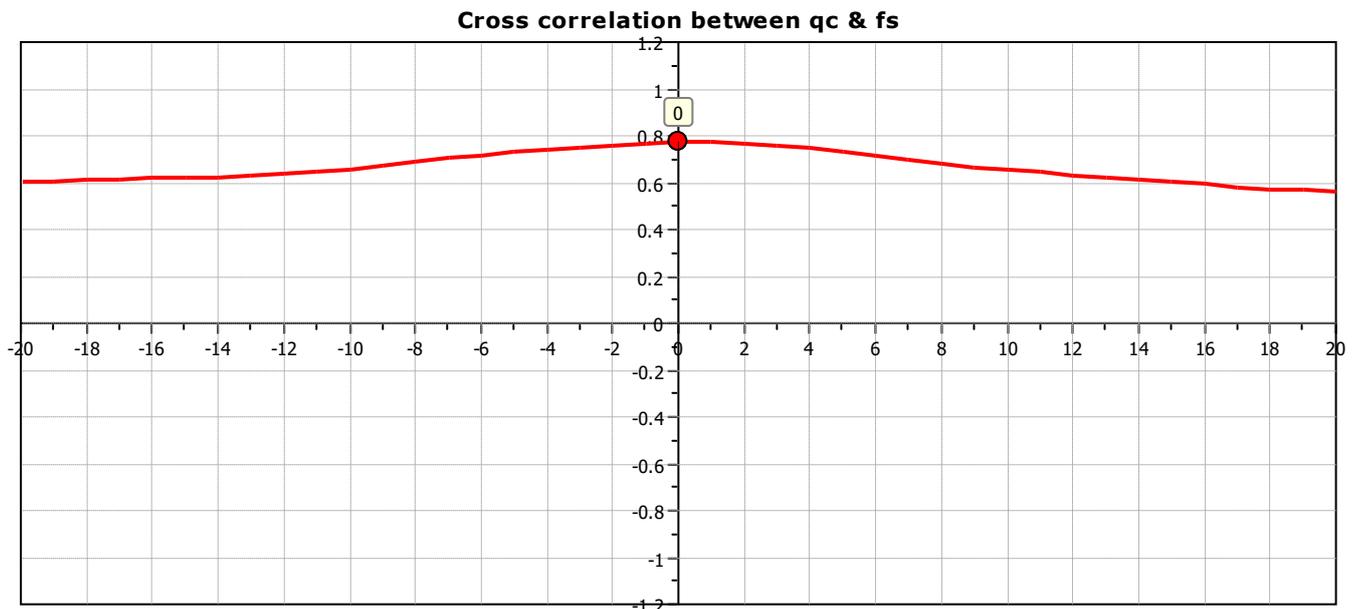


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K^*(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

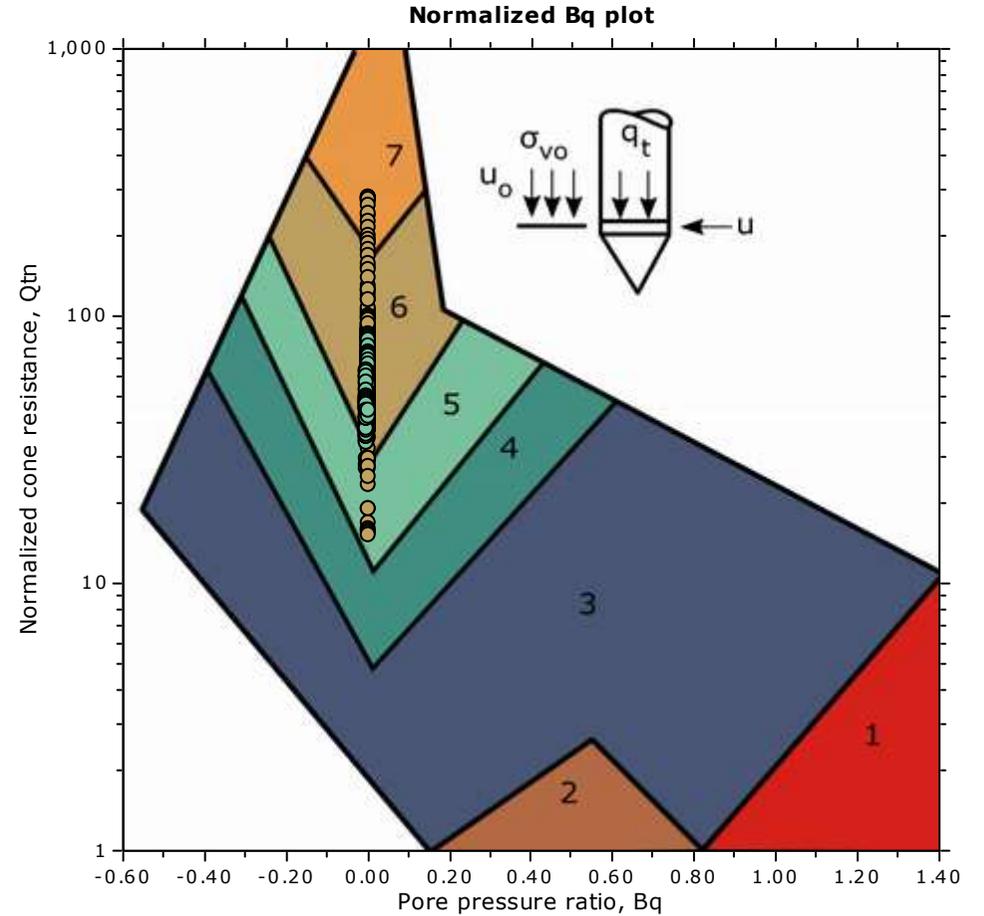
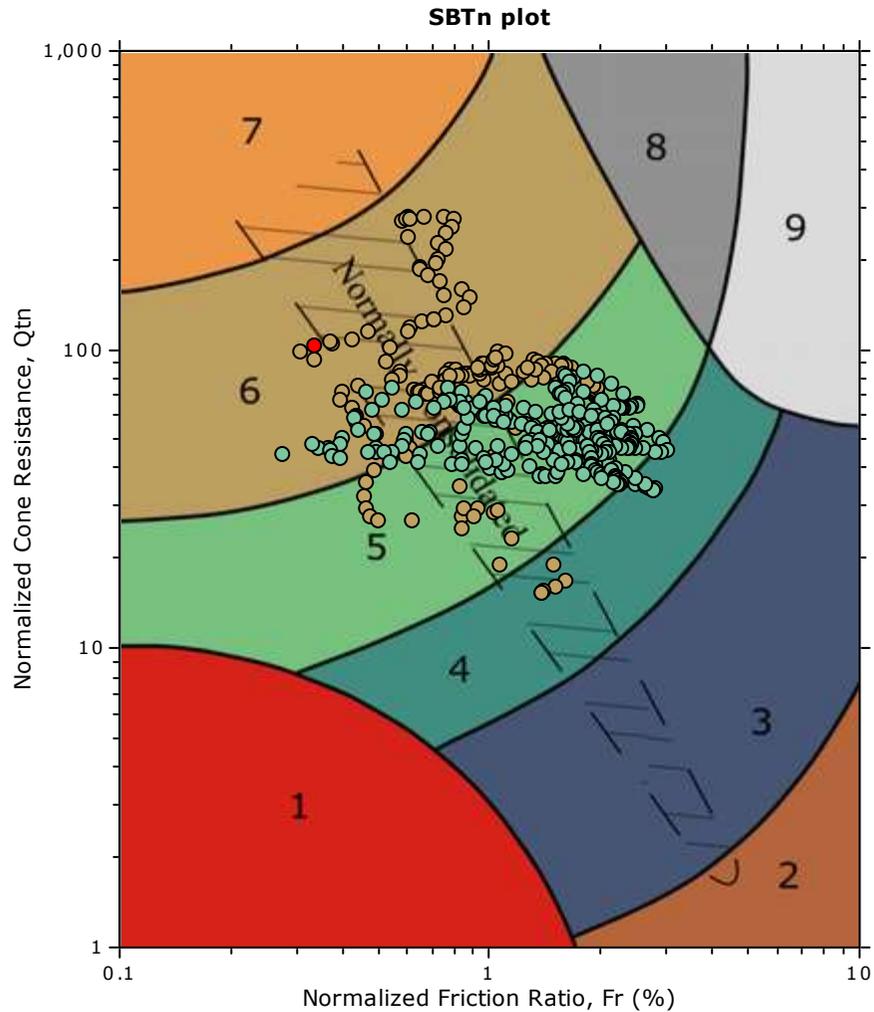


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



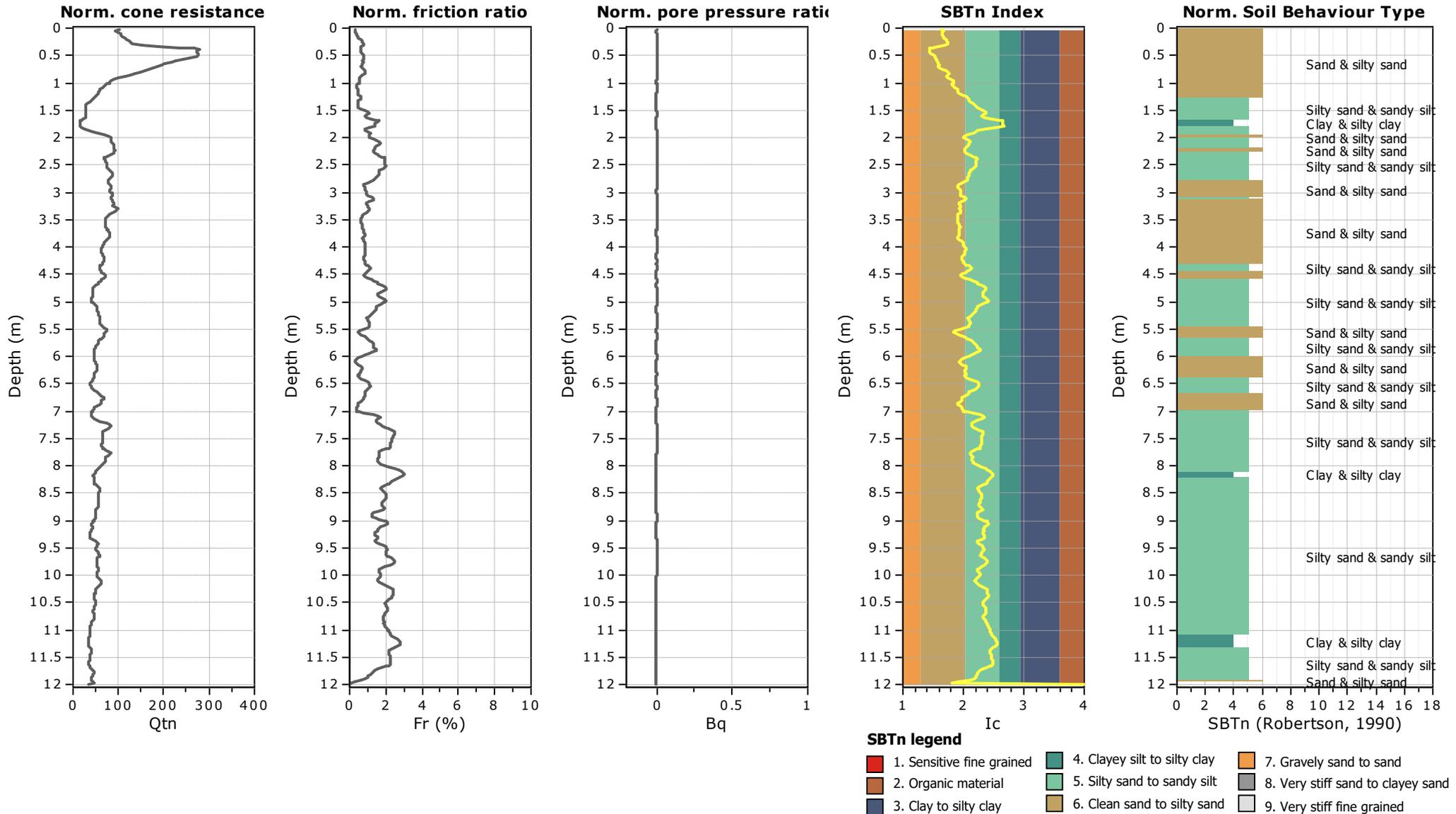


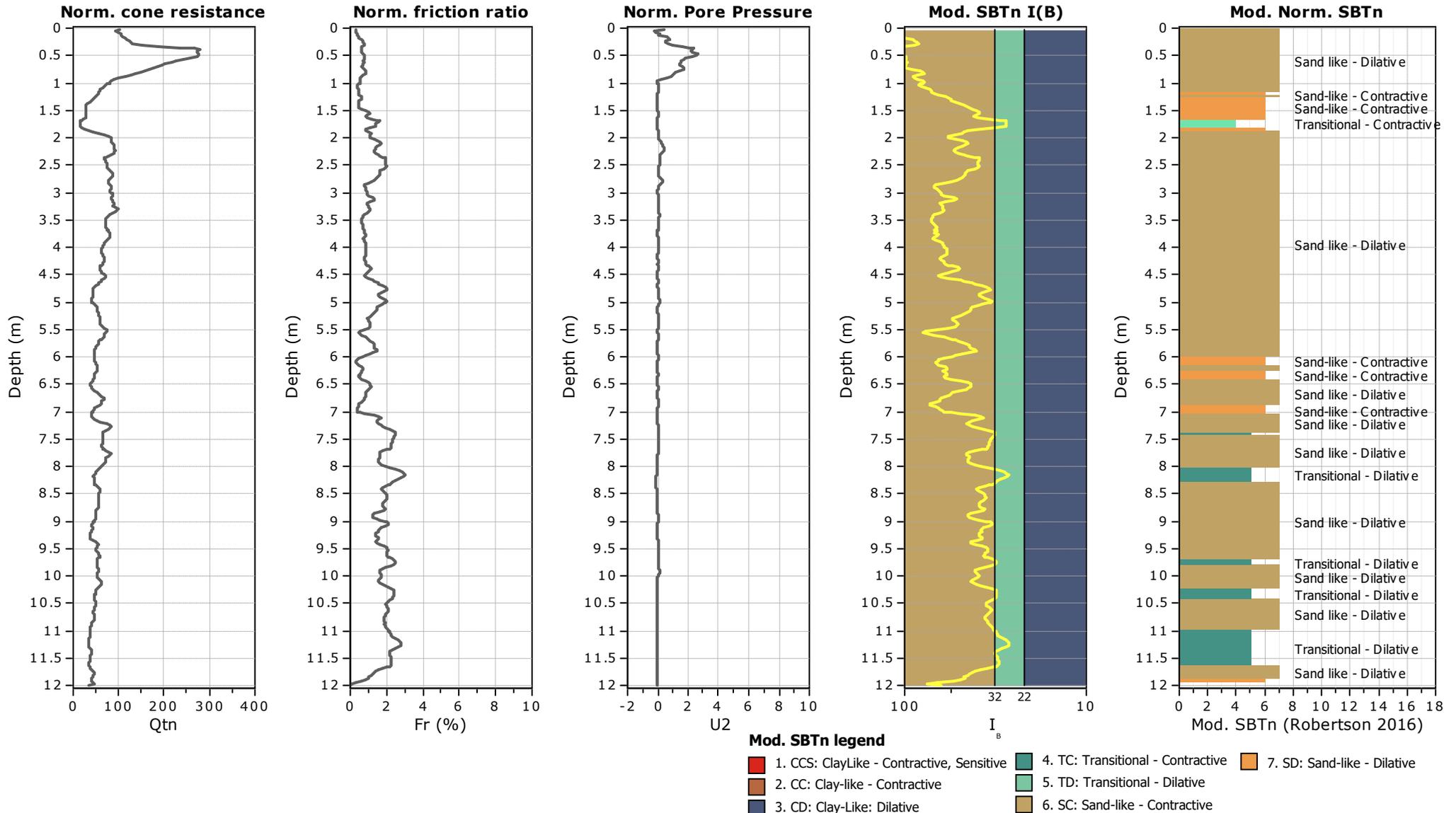
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

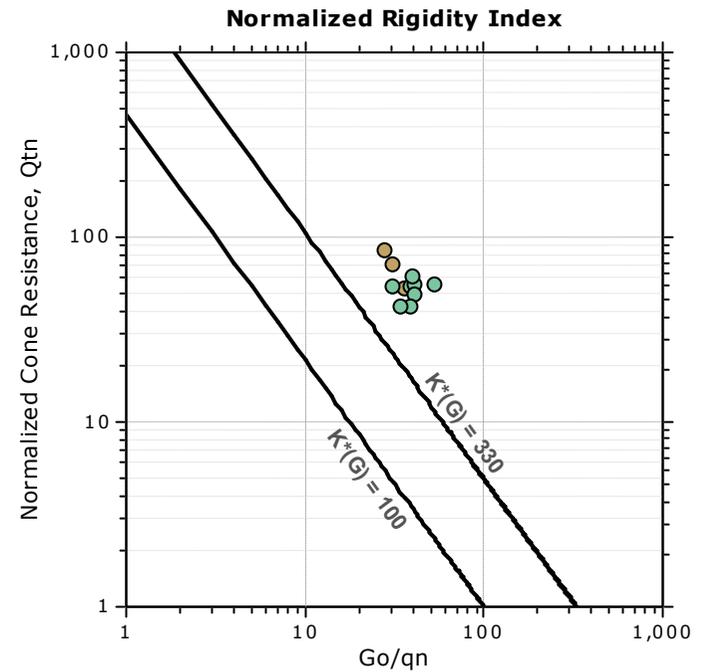
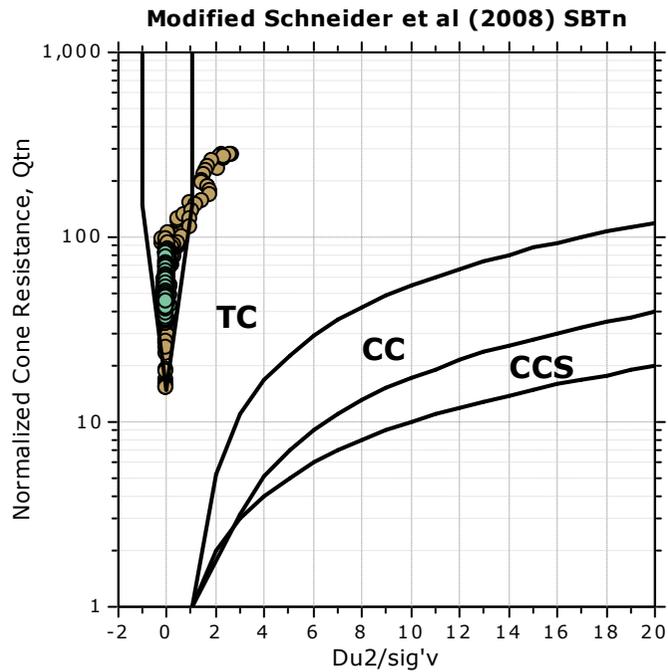
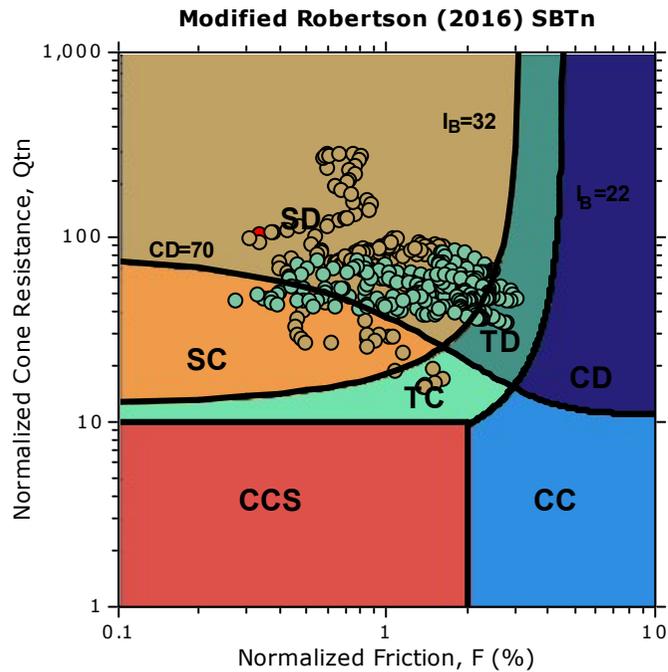
- | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Sensitive fine grained | 4. Clayey silt to silty clay | 7. Gravely sand to sand |
| 2. Organic material | 5. Silty sand to sandy silt | 8. Very stiff sand to clayey sand |
| 3. Clay to silty clay | 6. Clean sand to silty sand | 9. Very stiff fine grained |





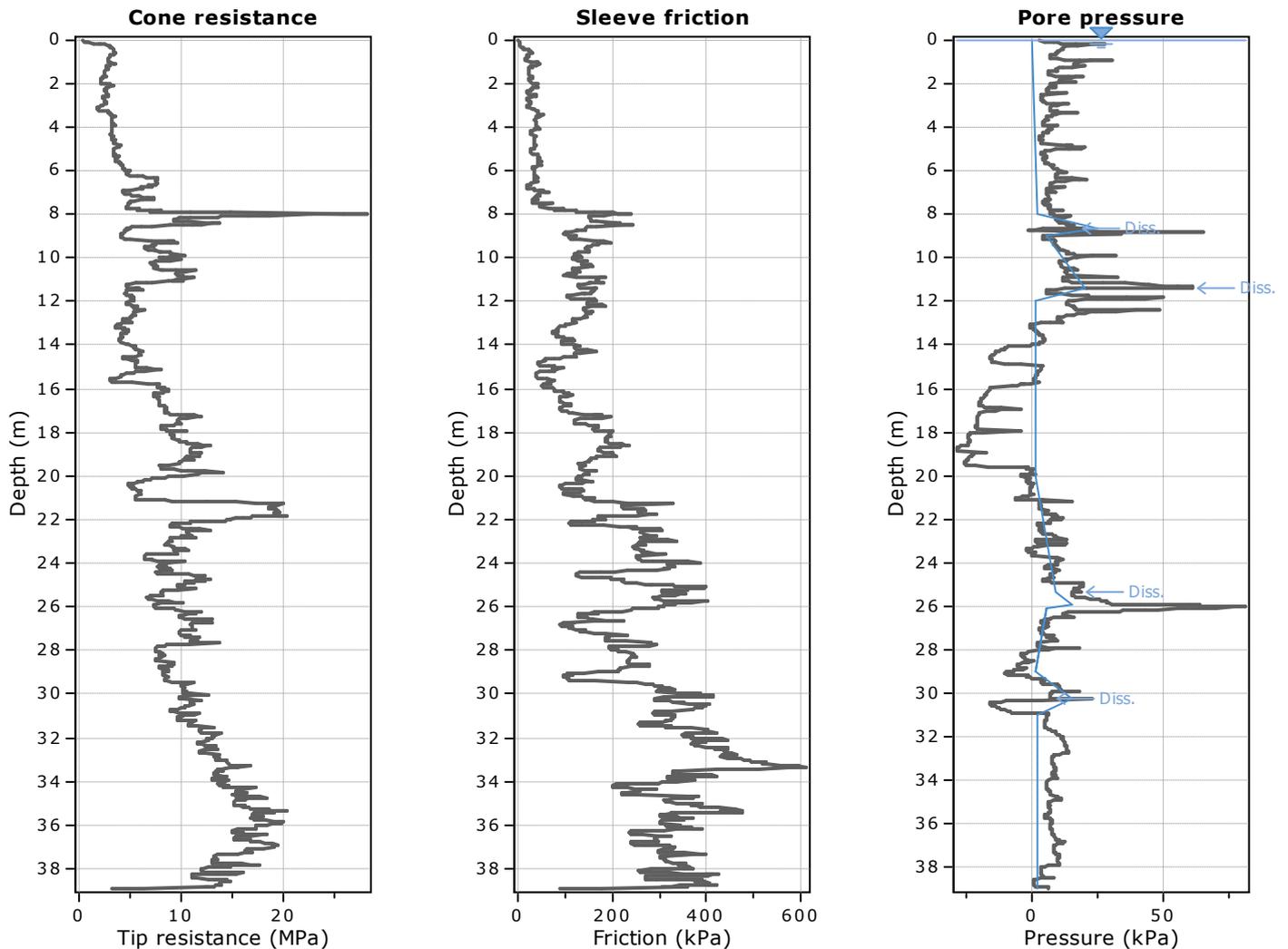


Updated SBTn plots

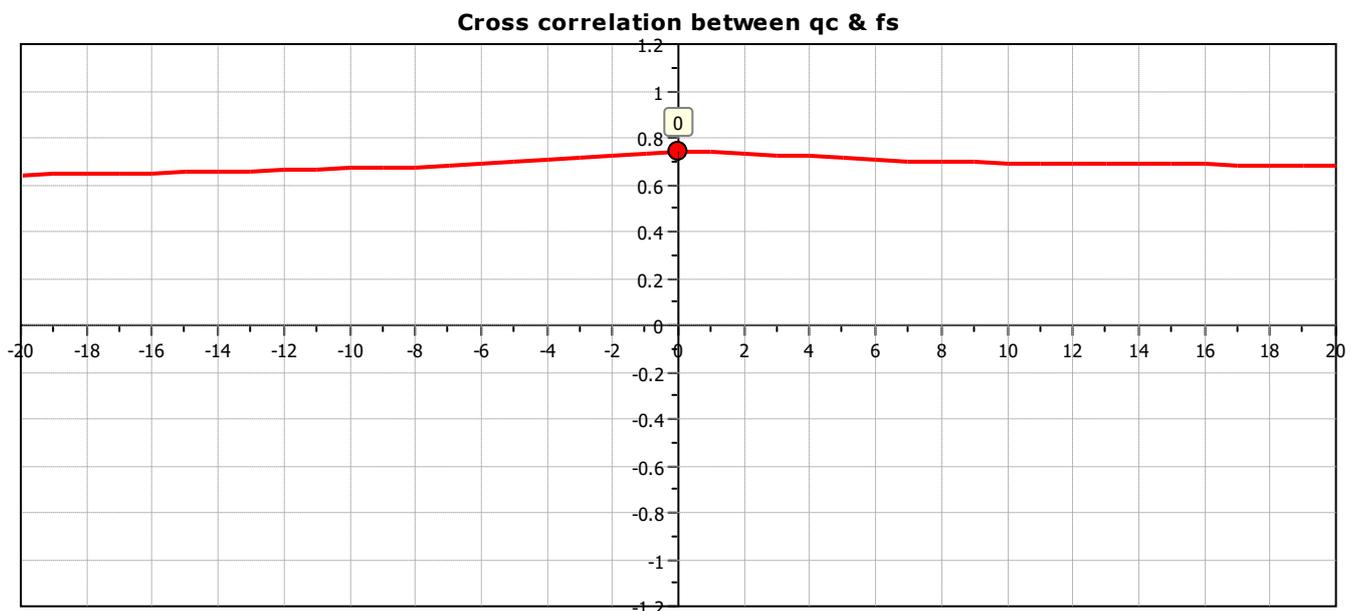


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

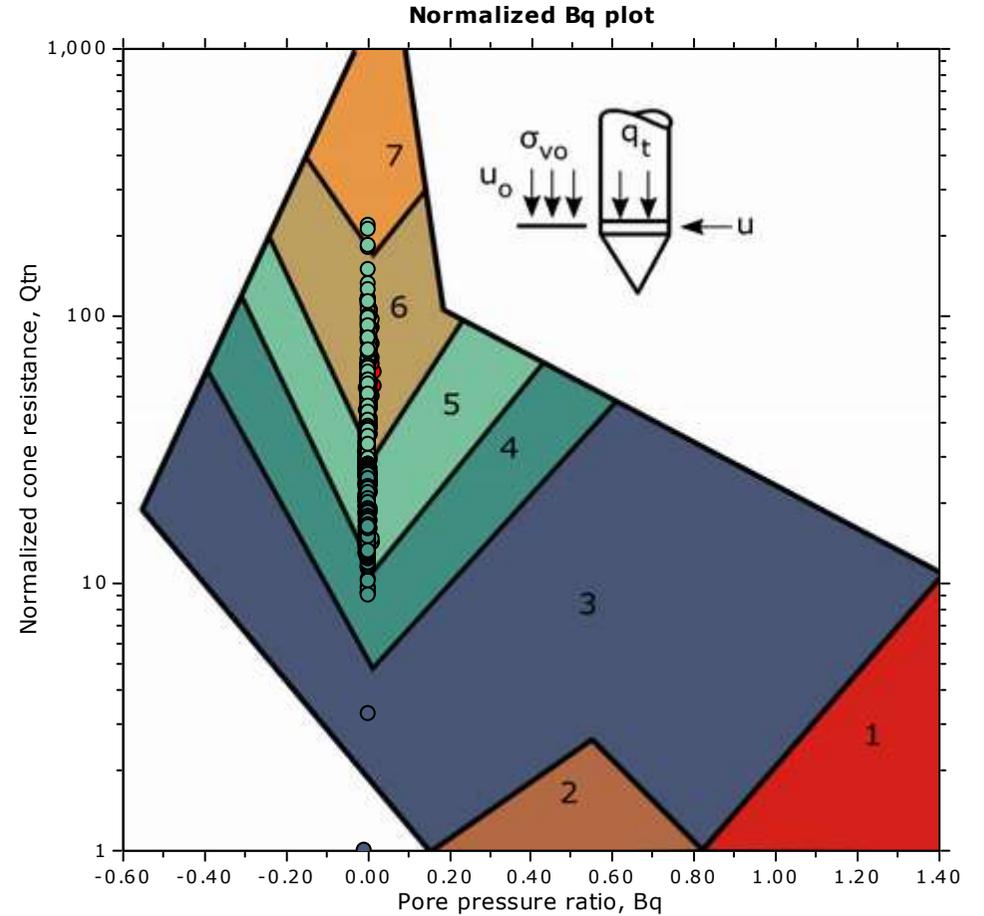
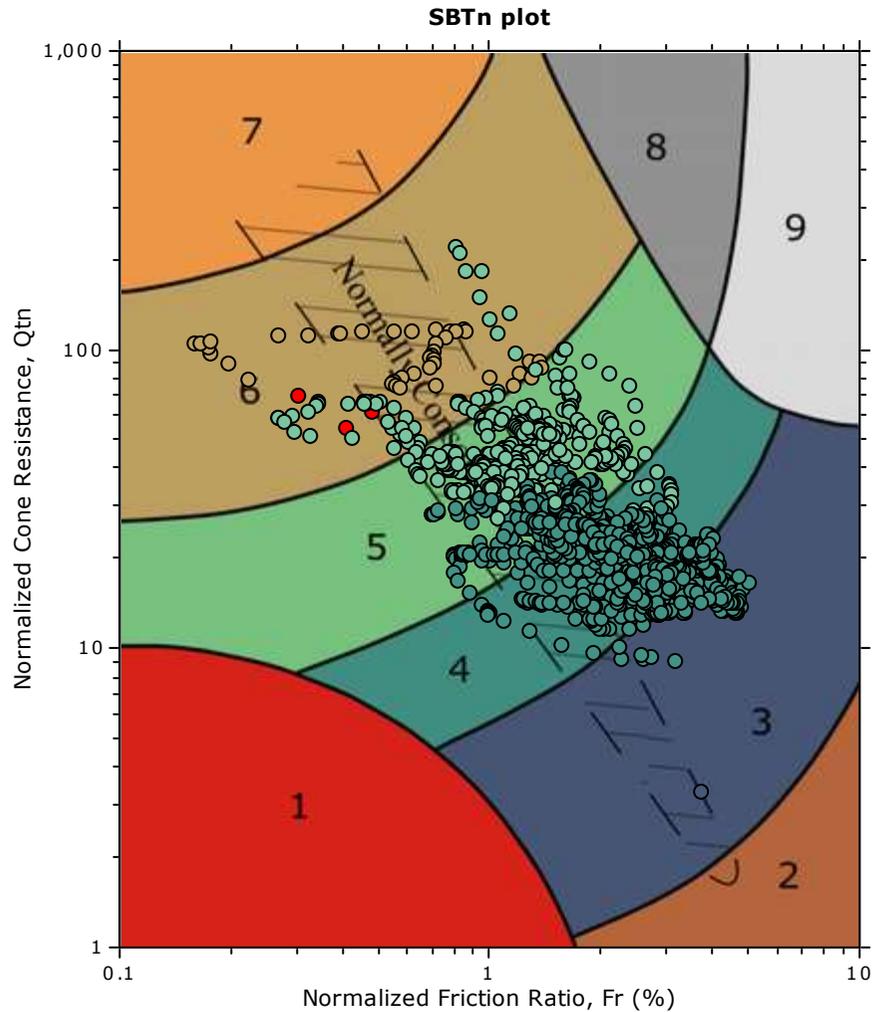


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



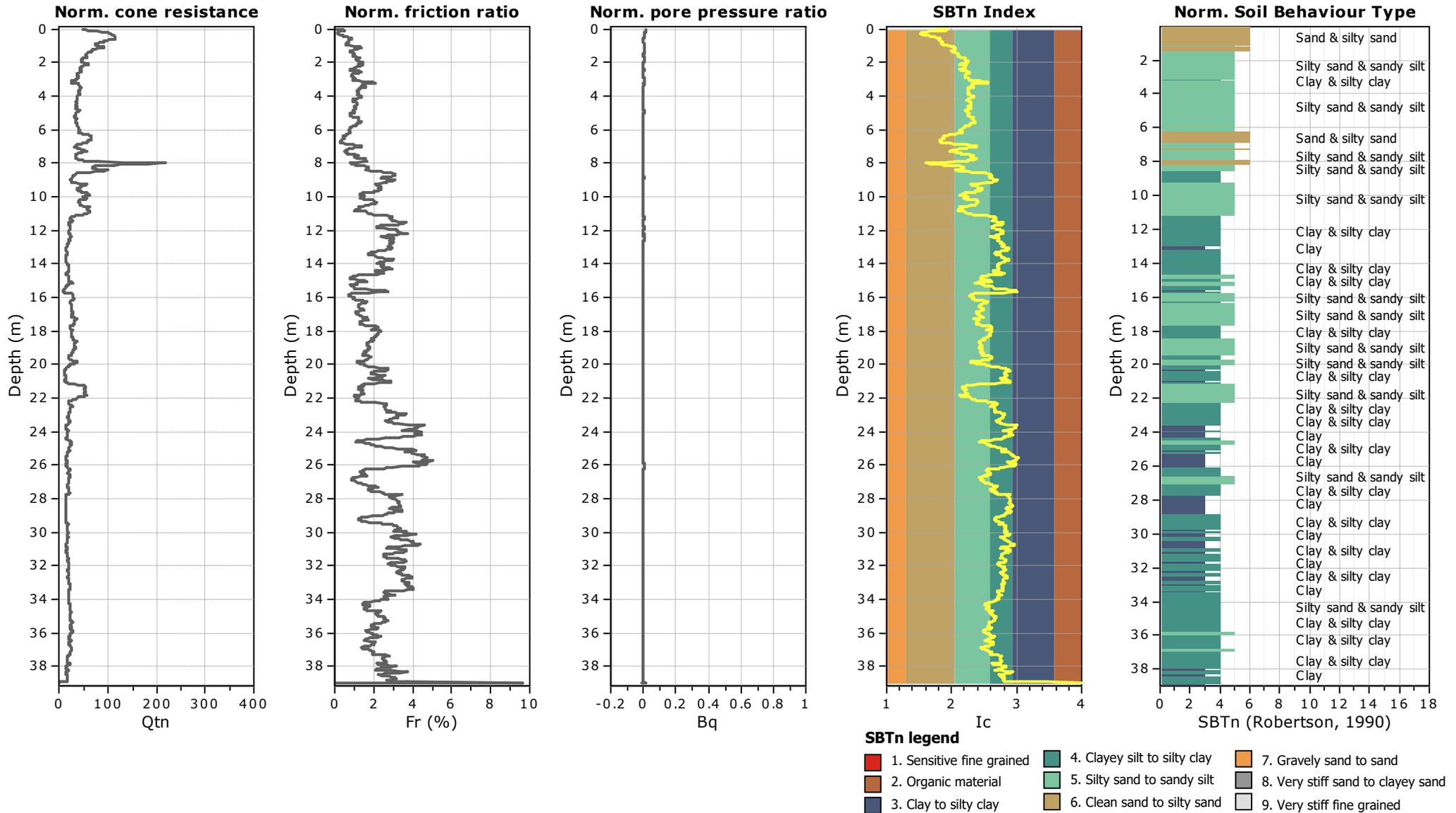


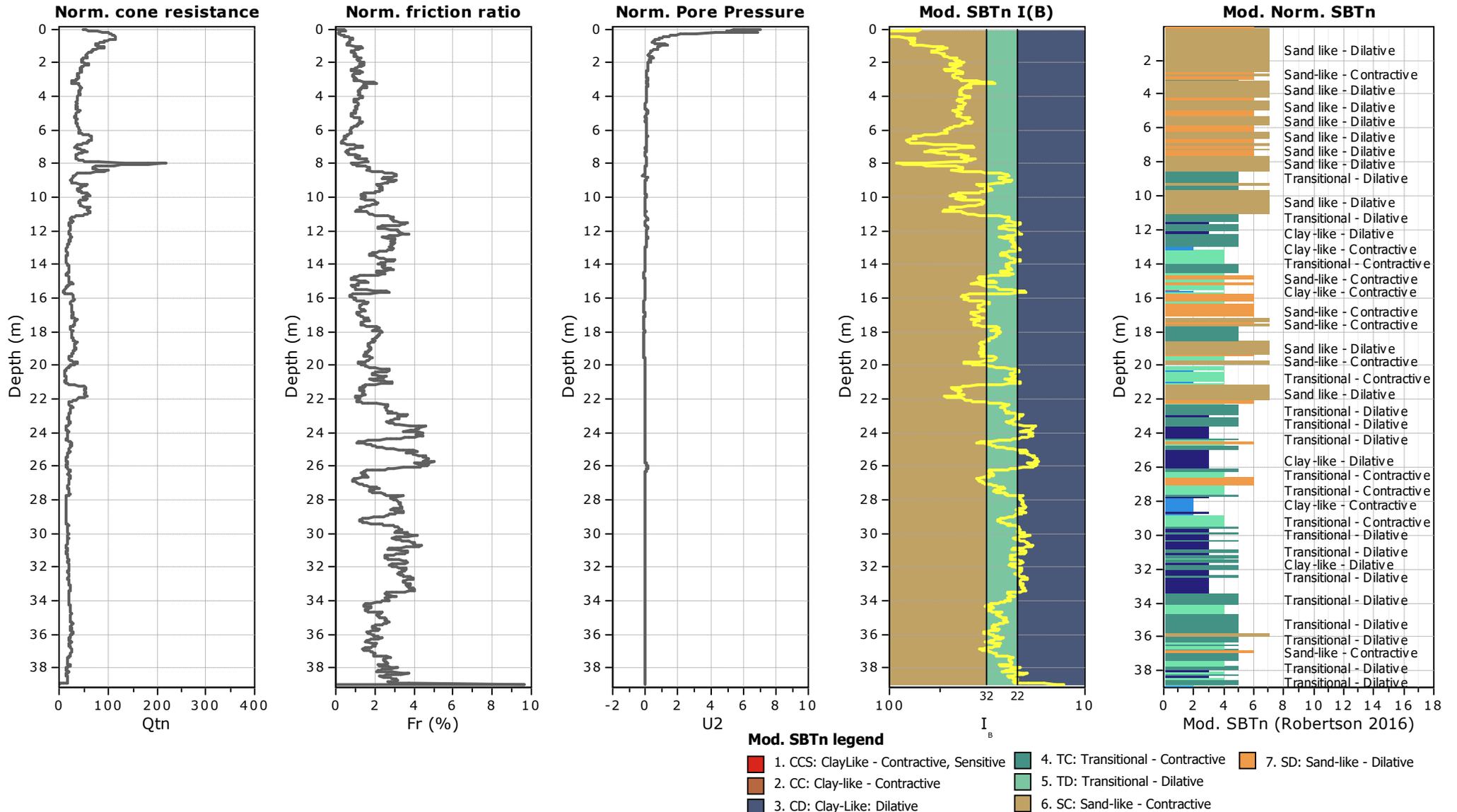
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

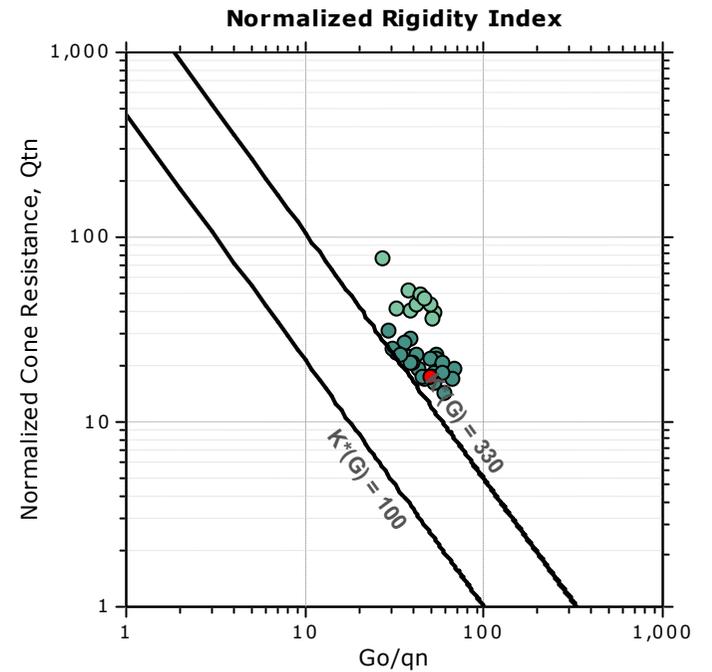
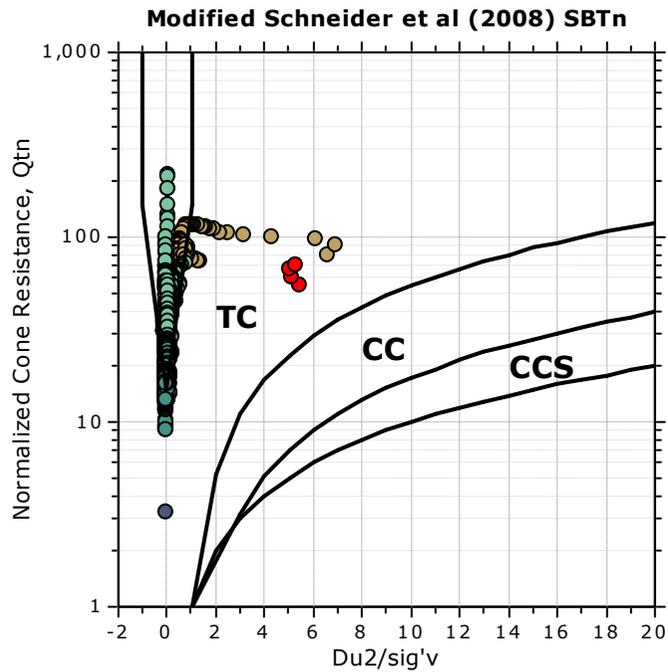
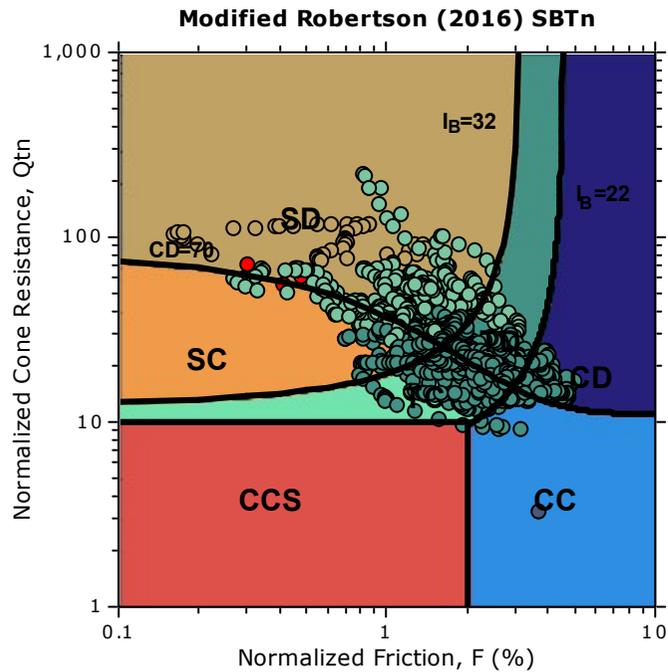
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





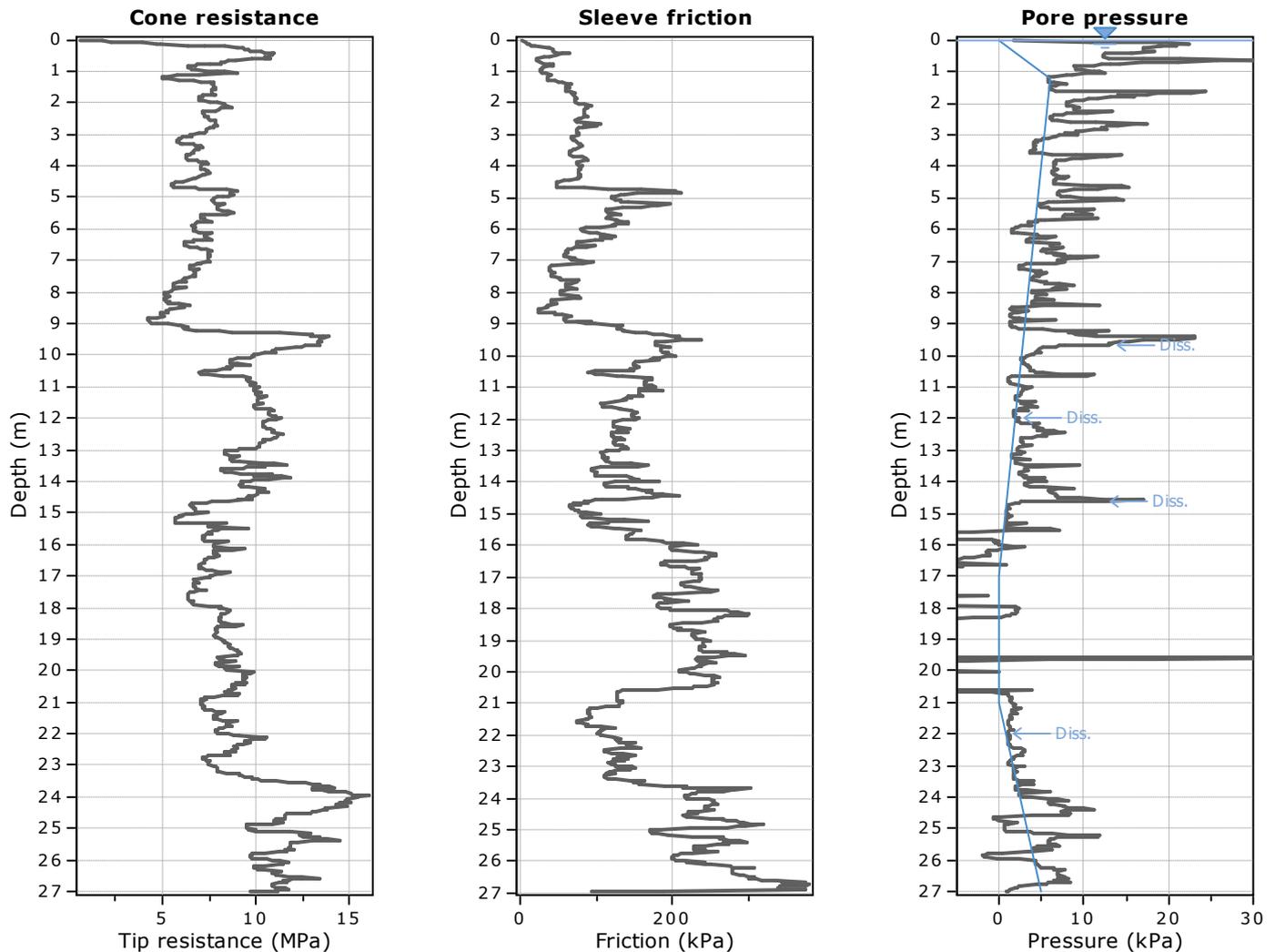


Updated SBTn plots

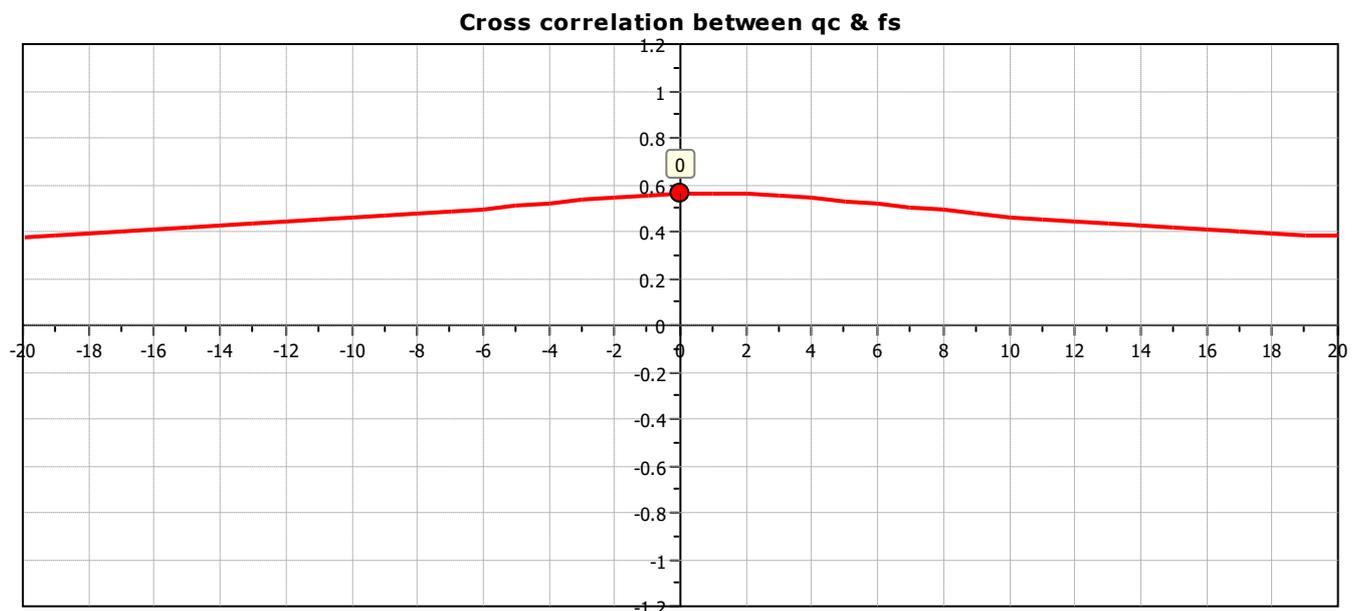


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

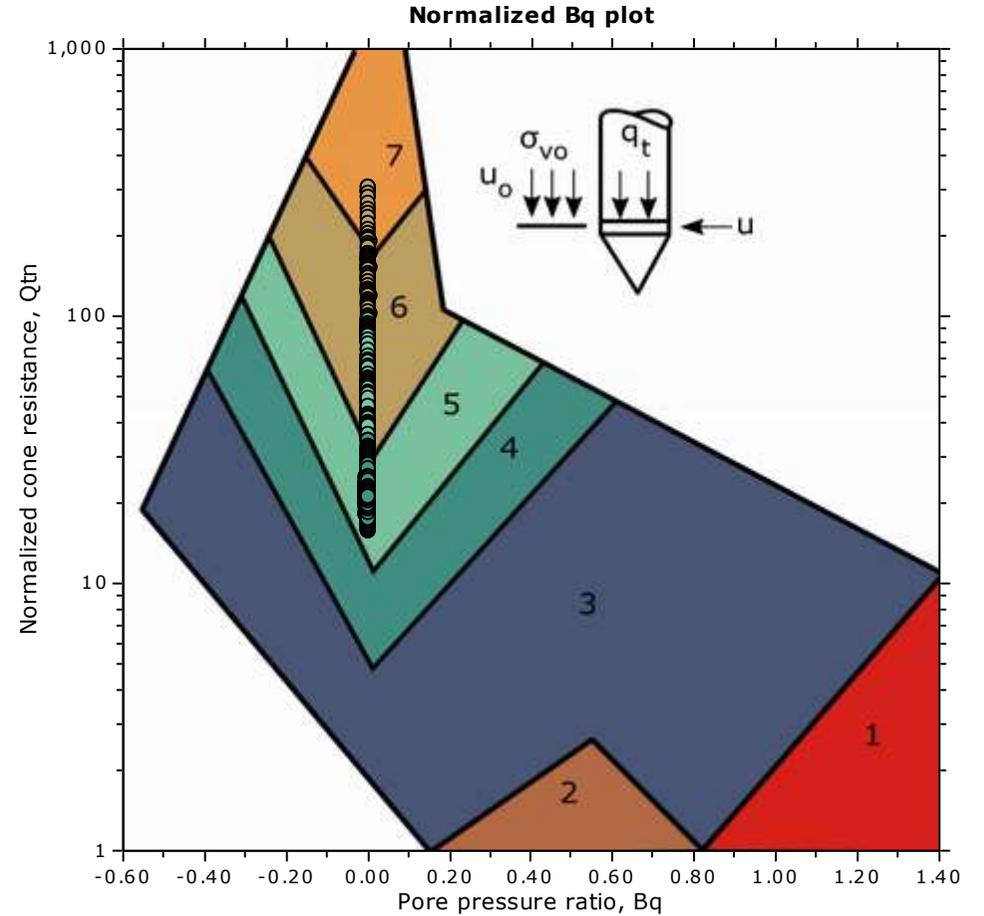
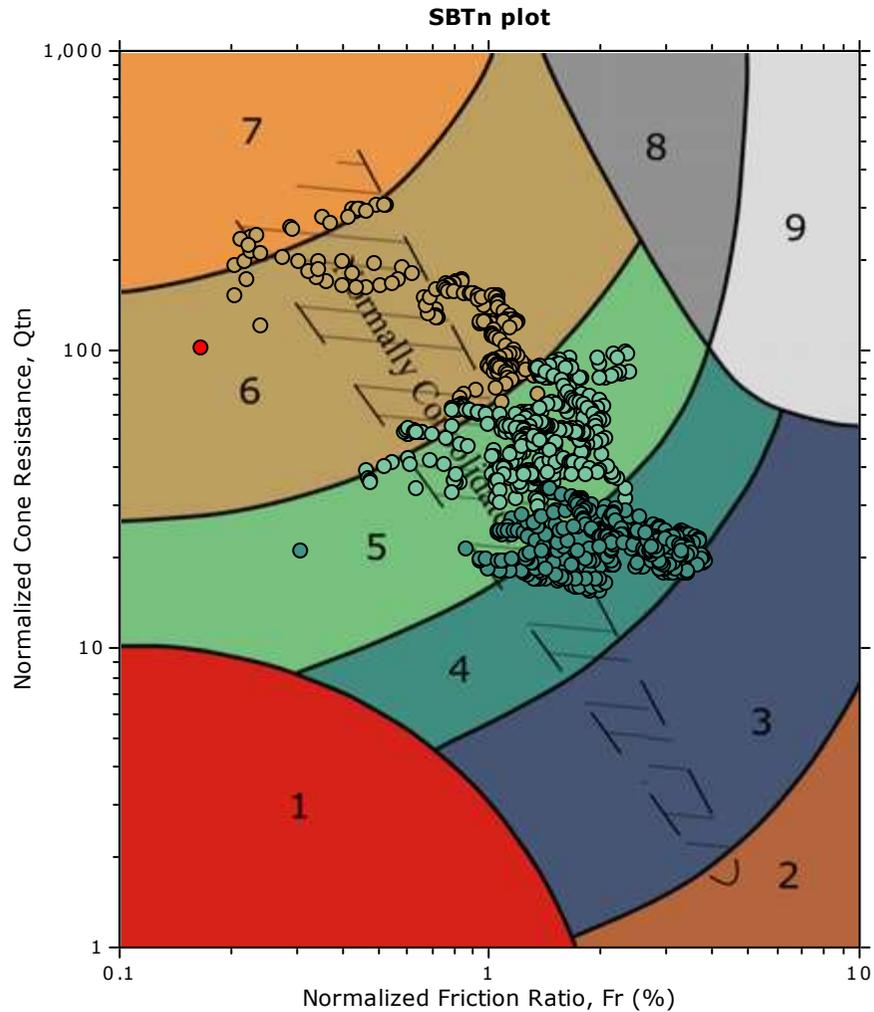


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



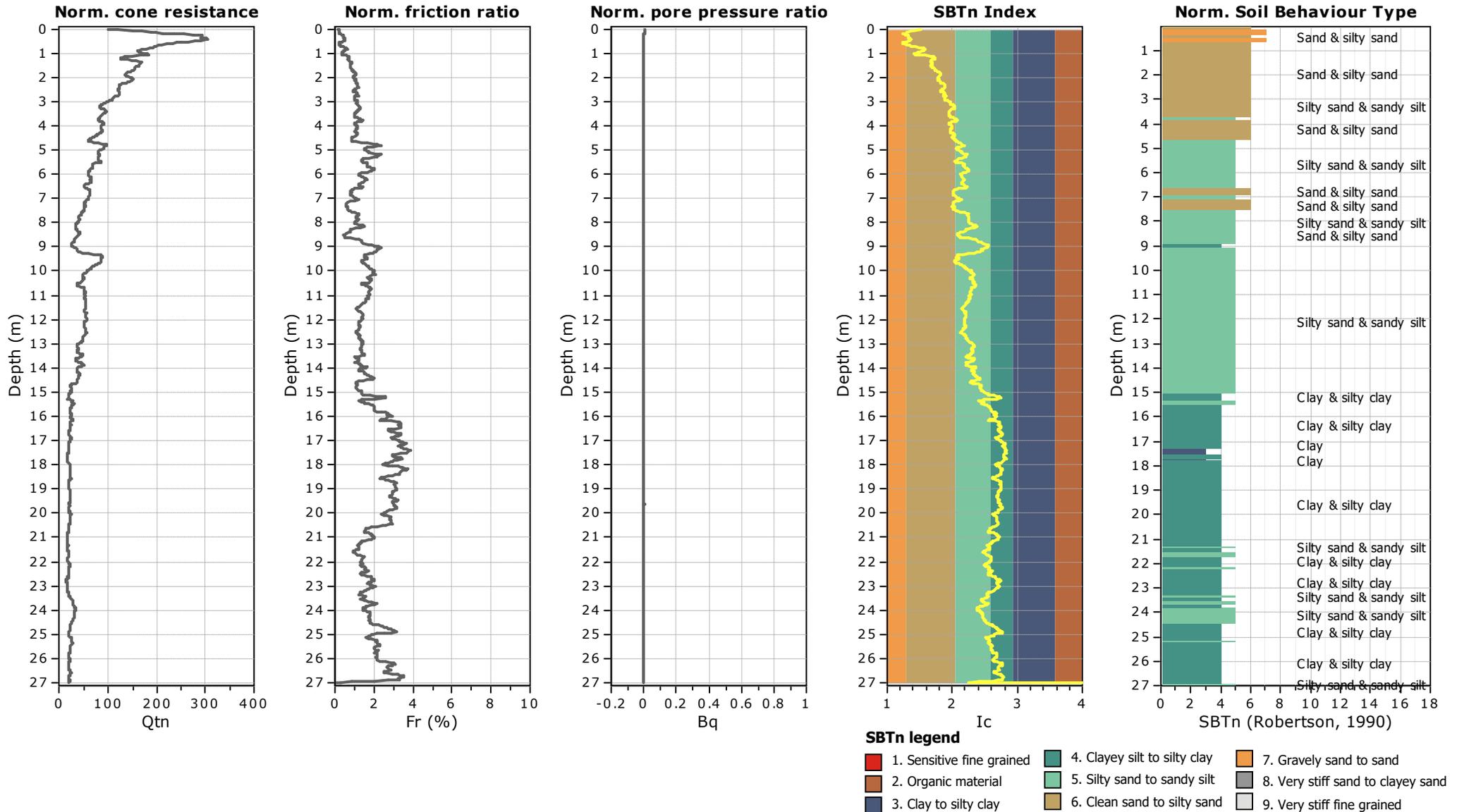


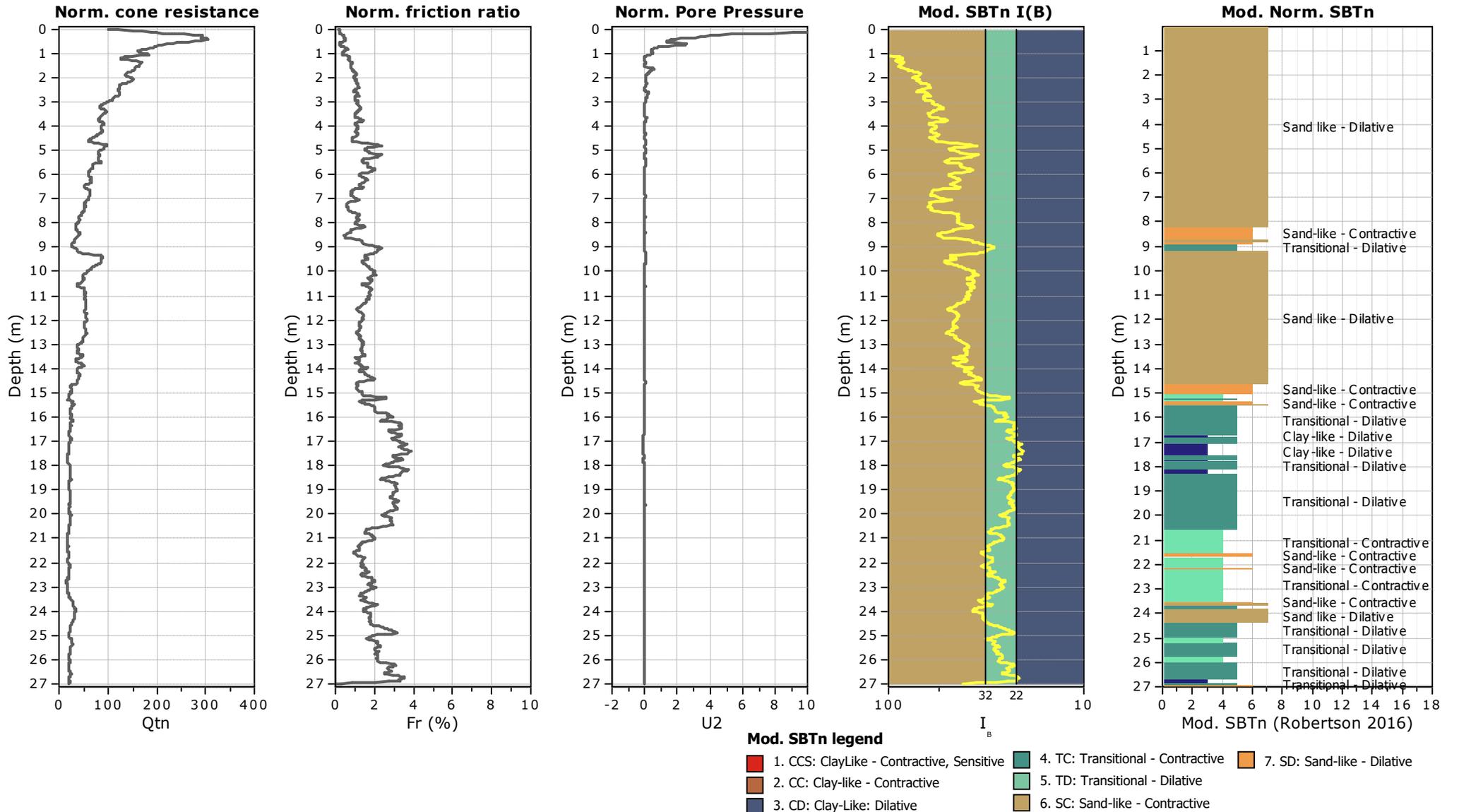
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

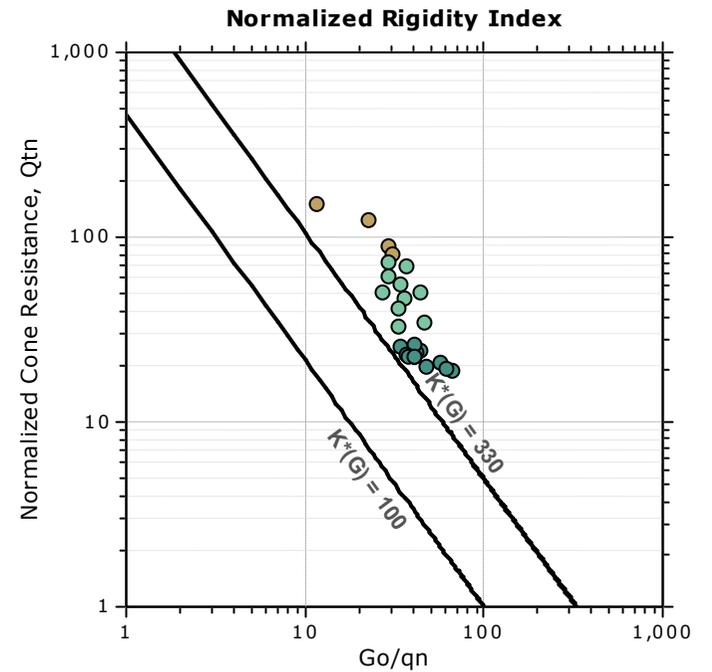
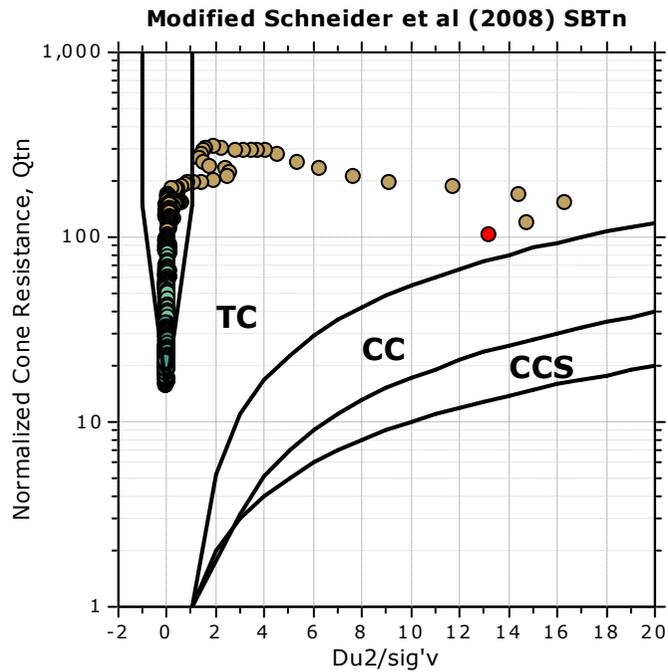
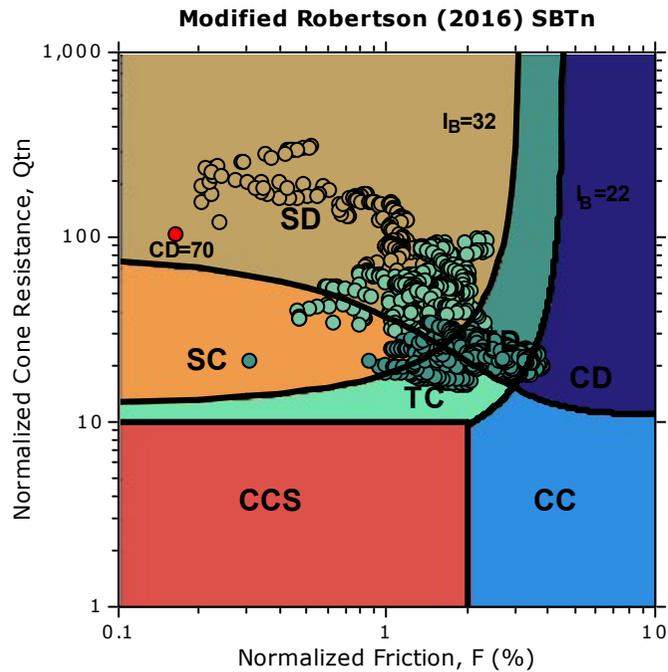
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |





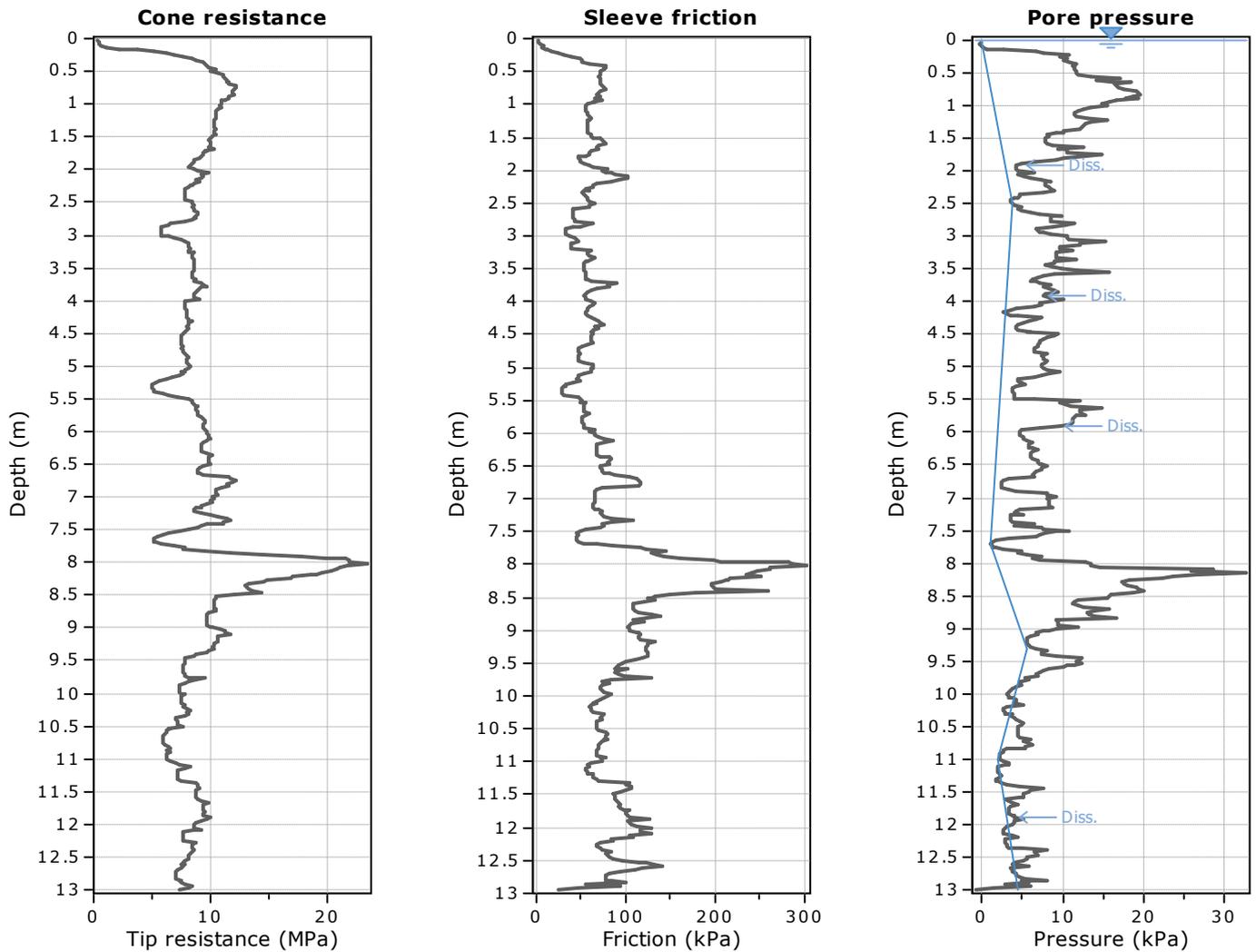


Updated SBTn plots

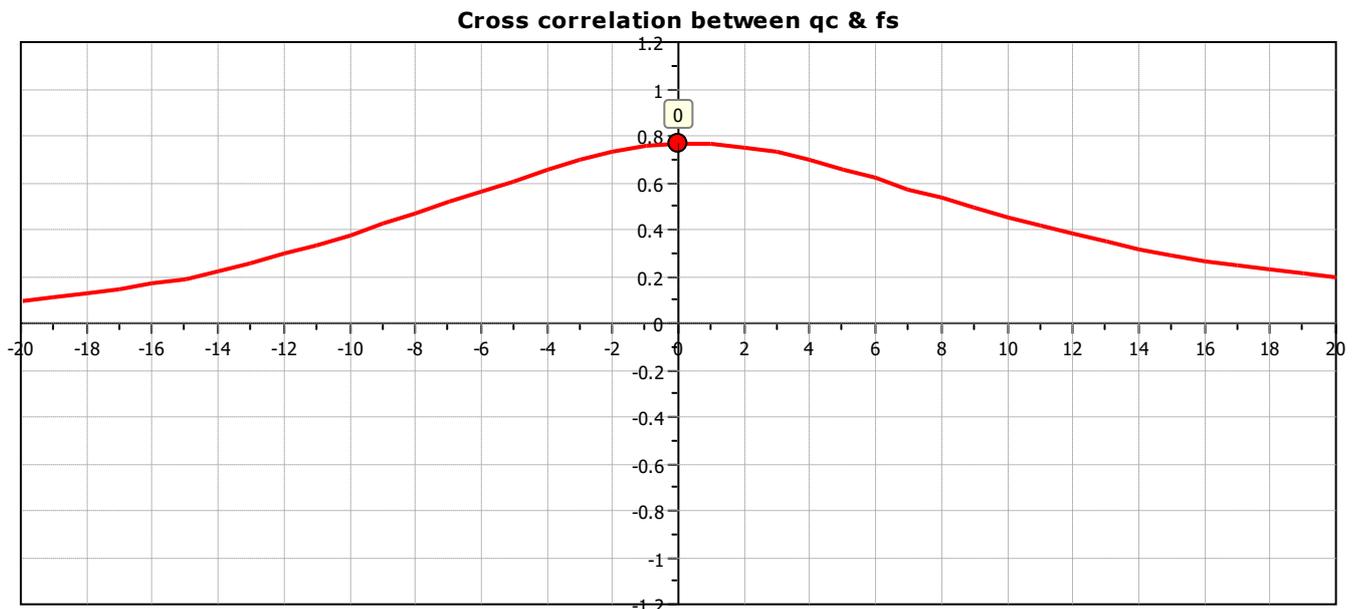


- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

$K^*(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

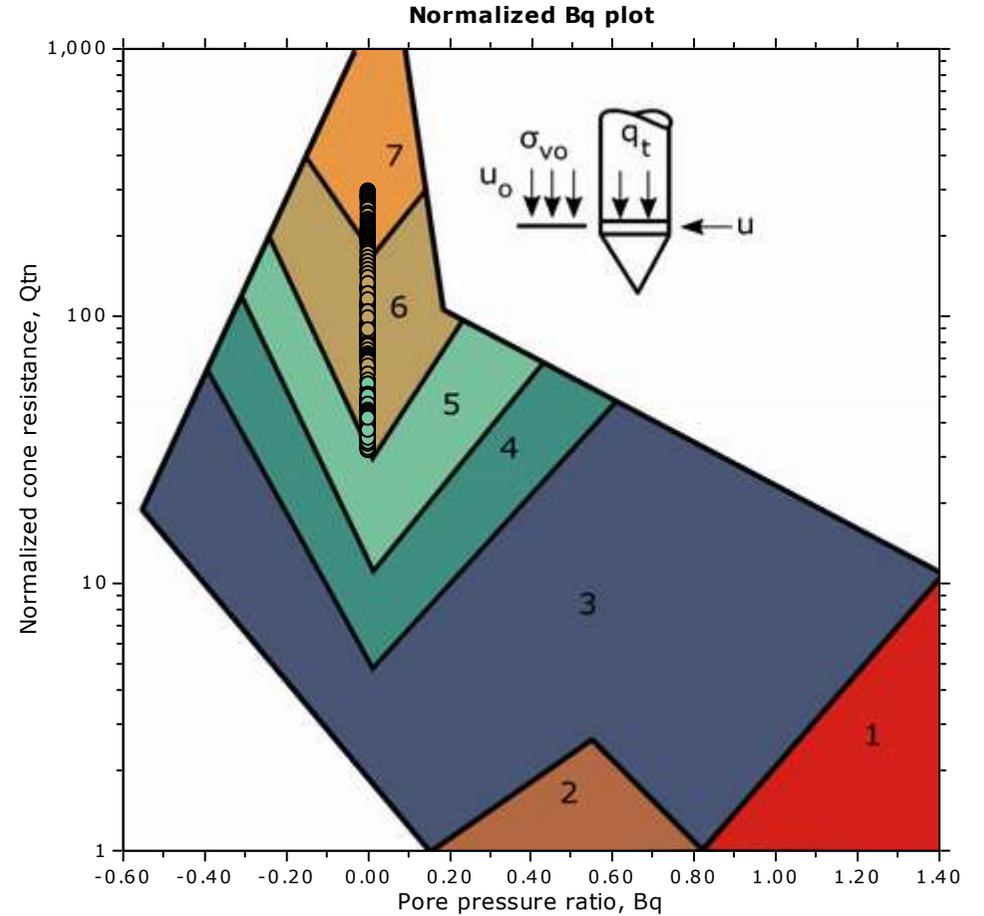
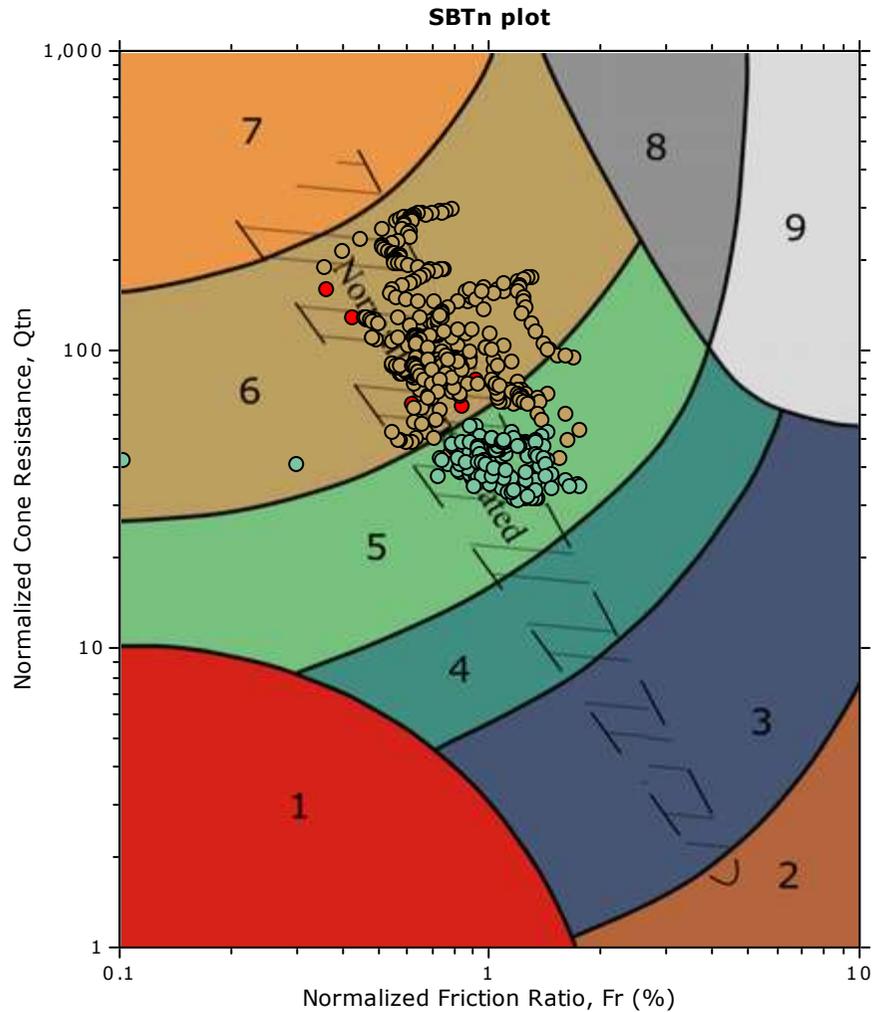


The plot below presents the cross correlation coefficient between the raw q_c and f_s values (as measured on the field). X axes presents the lag distance (one lag is the distance between two successive CPT measurements).



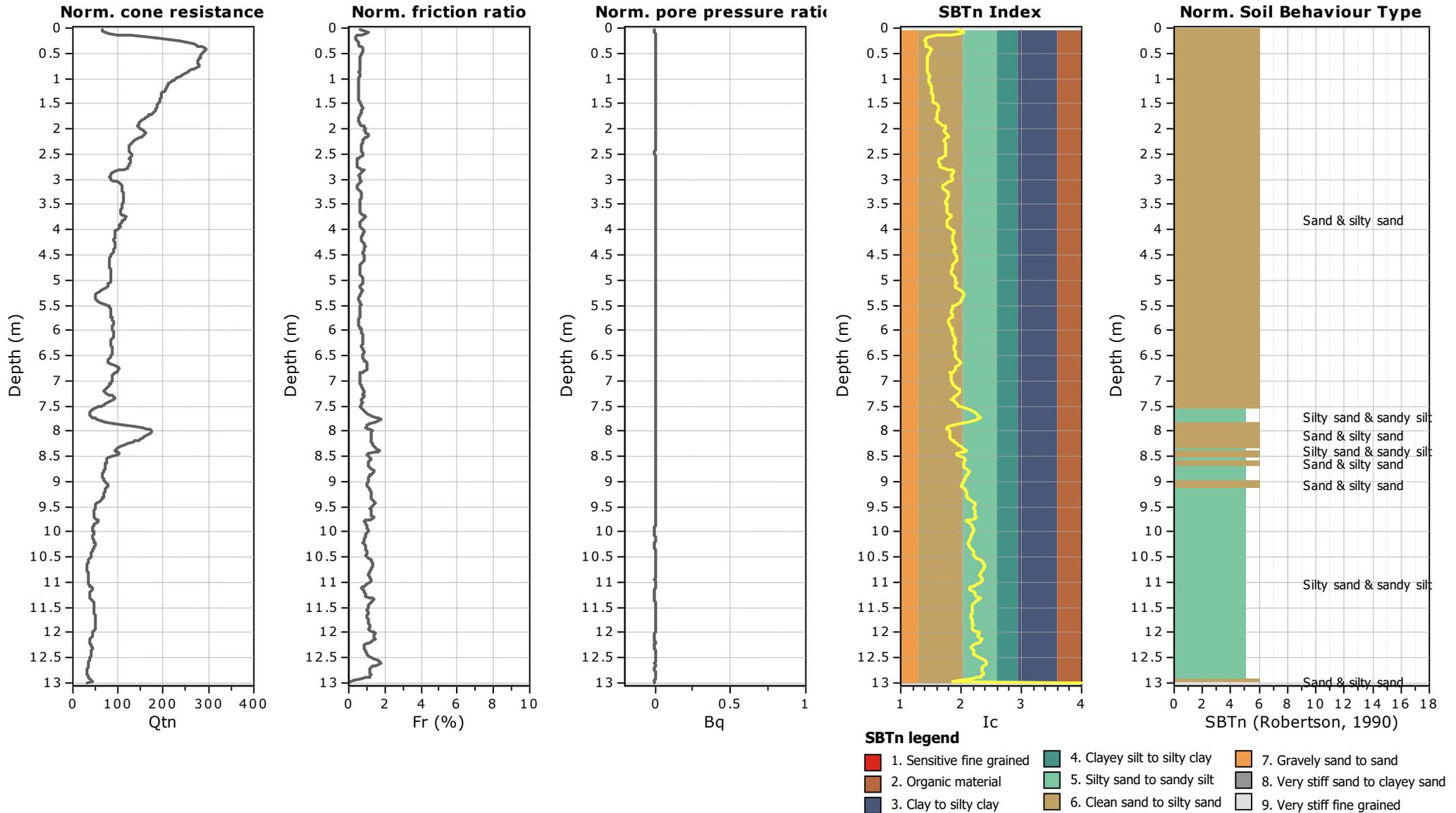


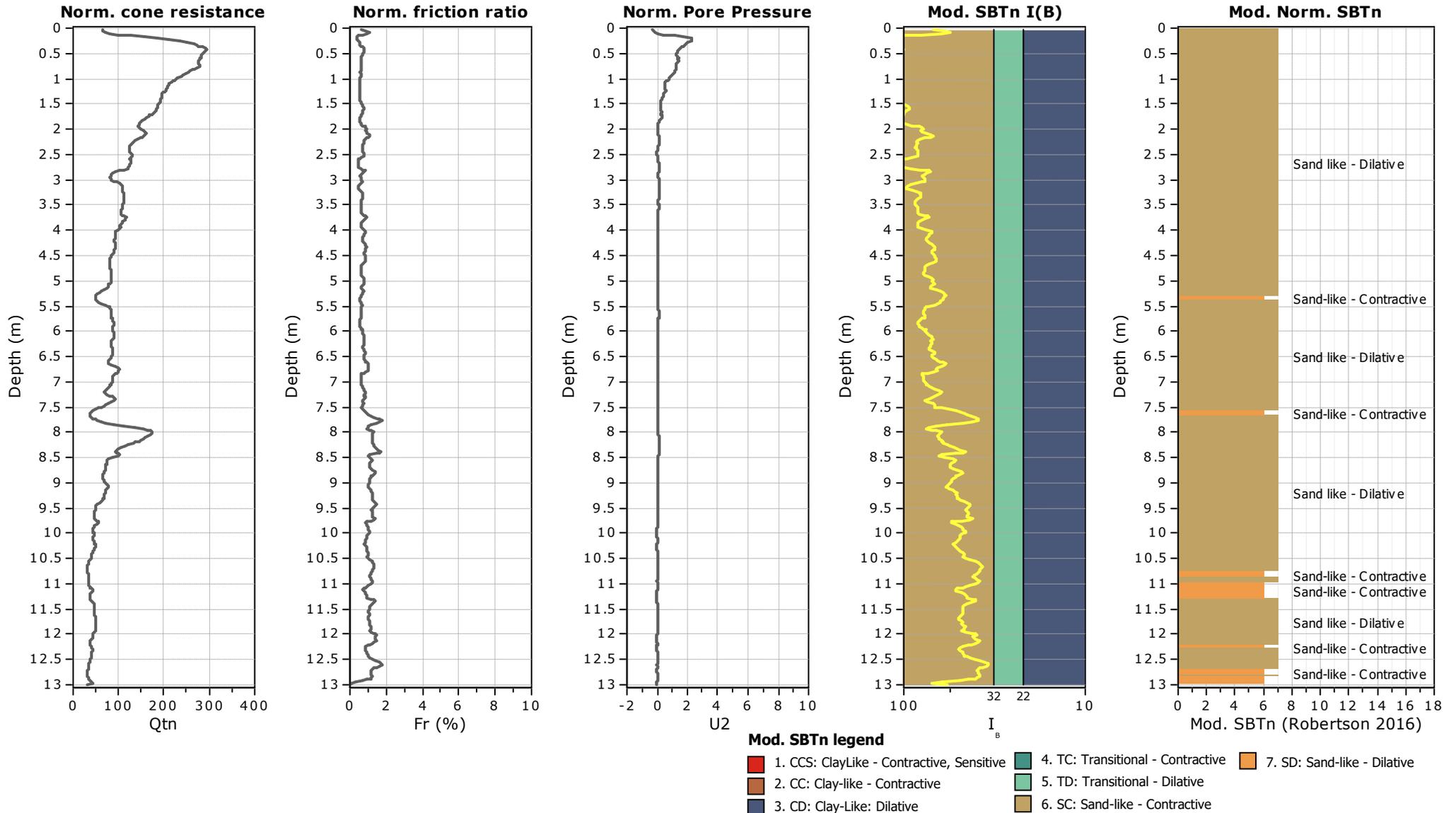
SBT - Bq plots (normalized)



SBTn legend

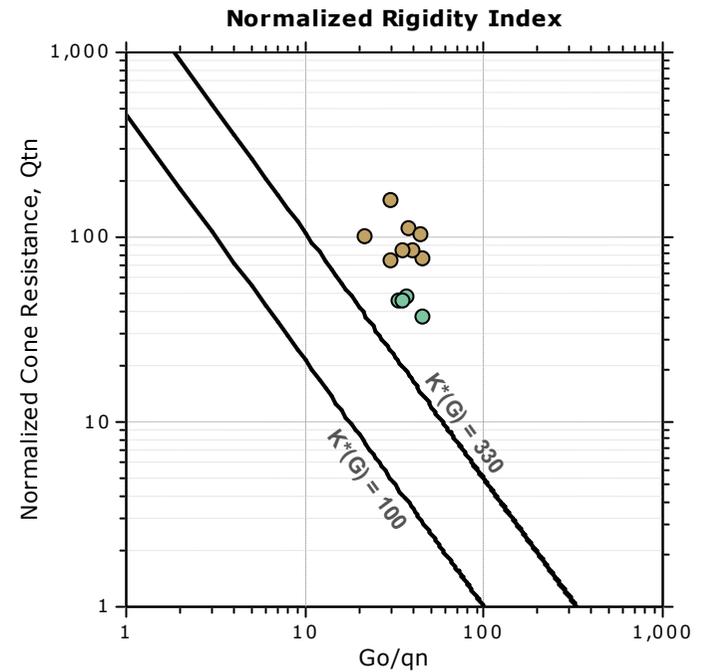
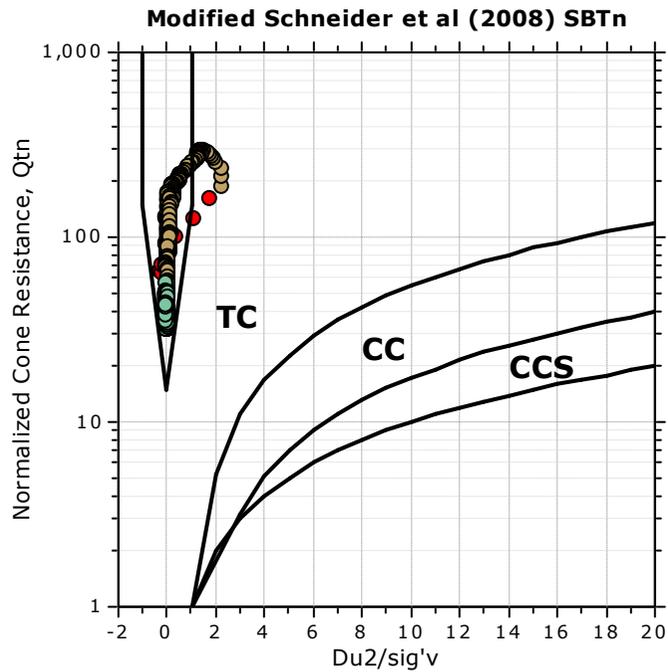
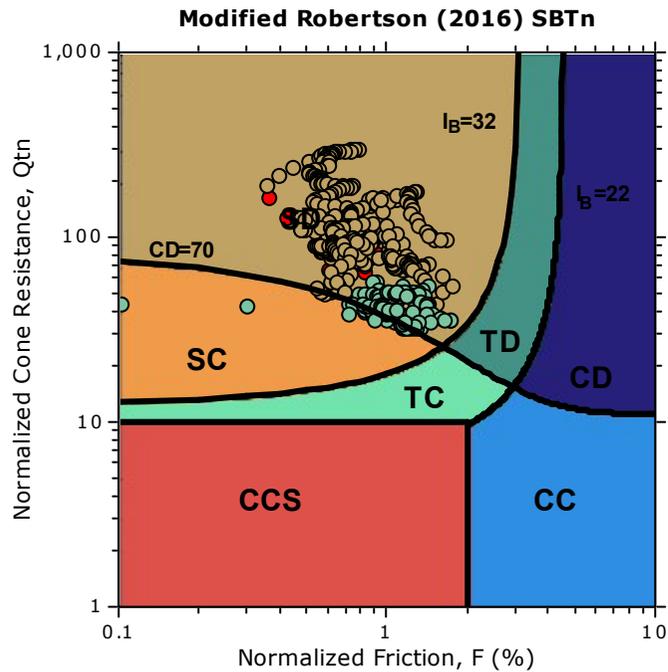
- | | | |
|--|---|---|
| ■ 1. Sensitive fine grained | ■ 4. Clayey silt to silty clay | ■ 7. Gravely sand to sand |
| ■ 2. Organic material | ■ 5. Silty sand to sandy silt | ■ 8. Very stiff sand to clayey sand |
| ■ 3. Clay to silty clay | ■ 6. Clean sand to silty sand | ■ 9. Very stiff fine grained |







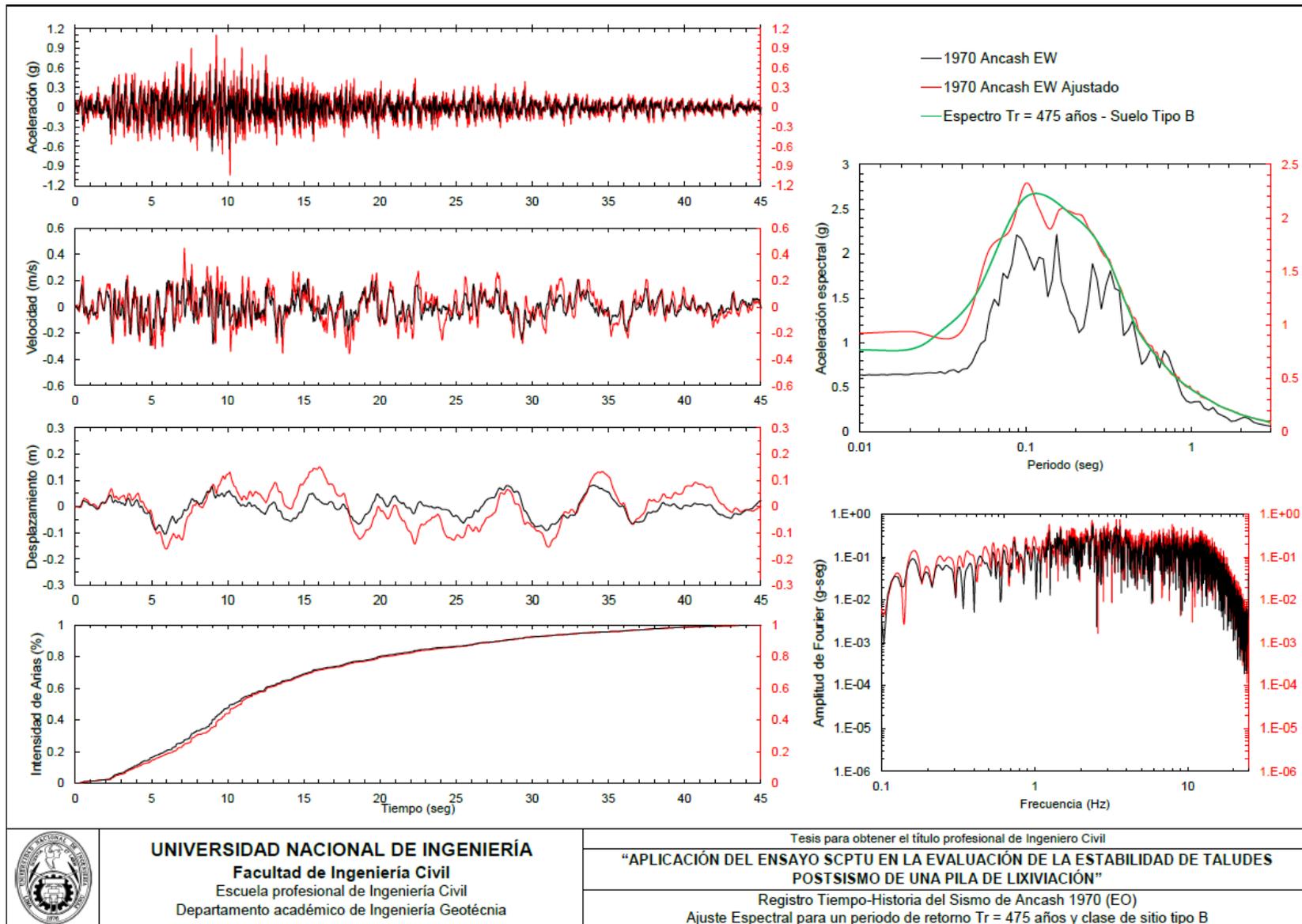
Updated SBTn plots

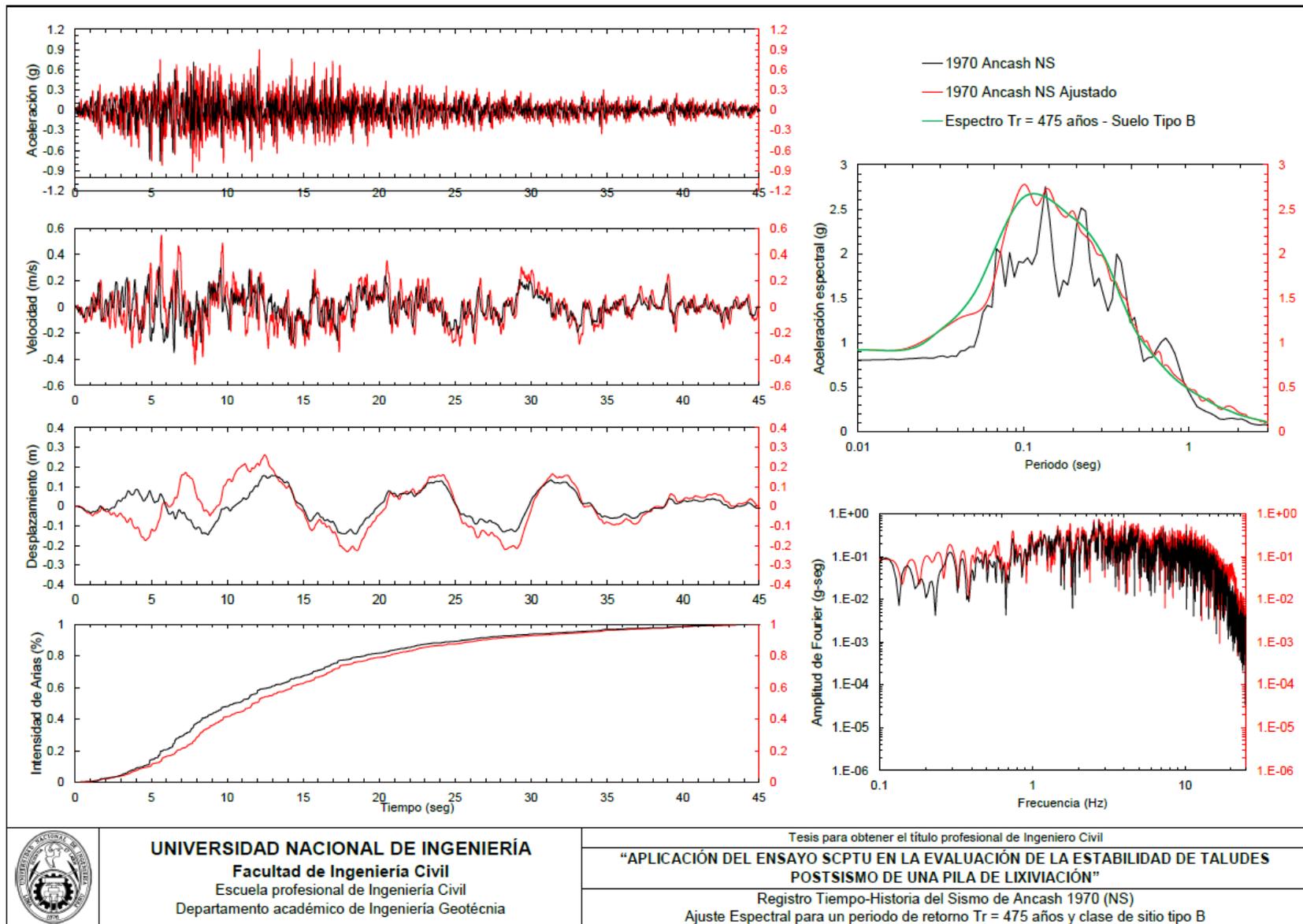


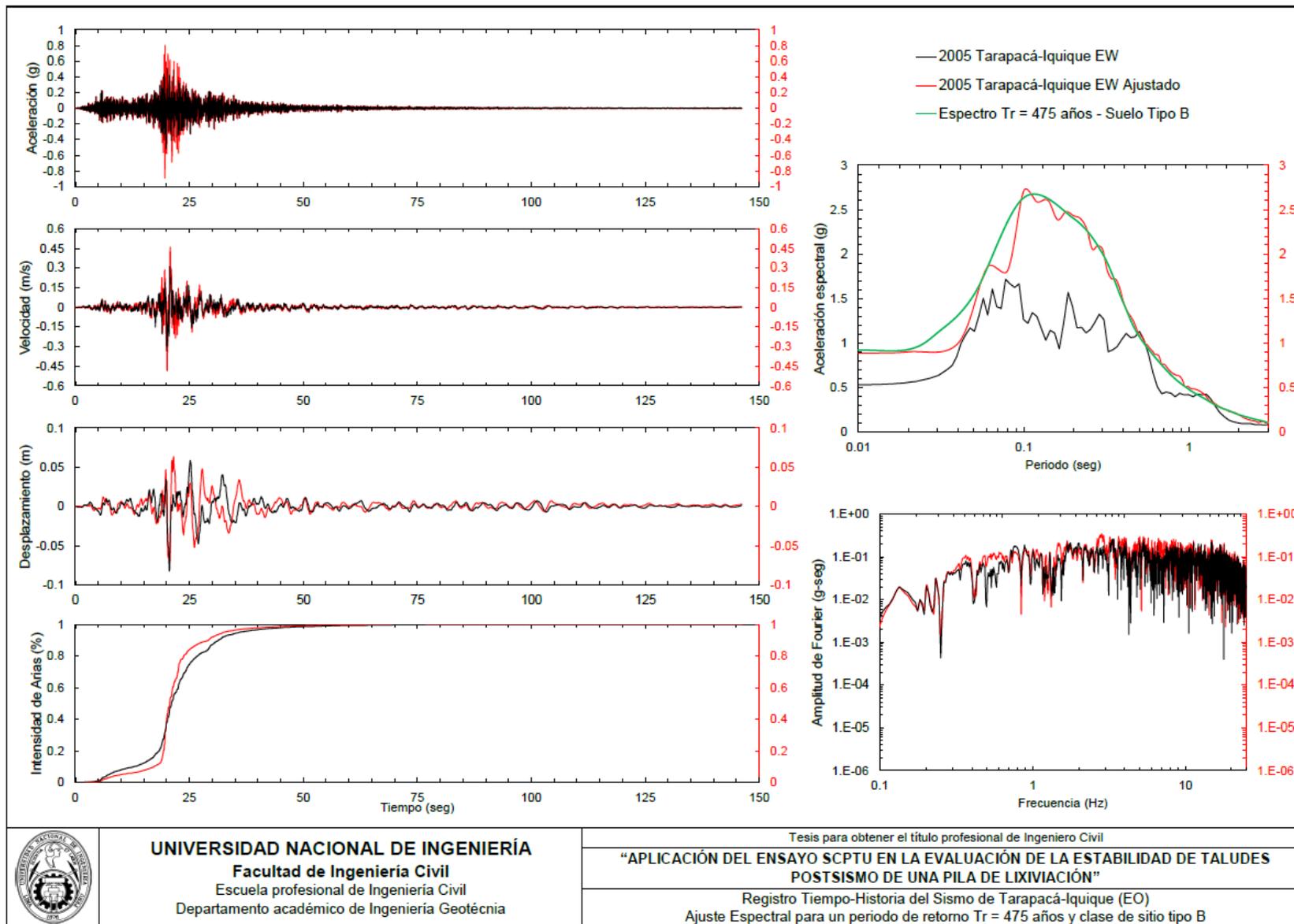
- CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
- CC: Clay-like - Contractive
- CD: Clay-like - Dilative
- TC: Transitional - Contractive
- TD: Transitional - Dilative
- SC: Sand-like - Contractive
- SD: Sand-like - Dilative

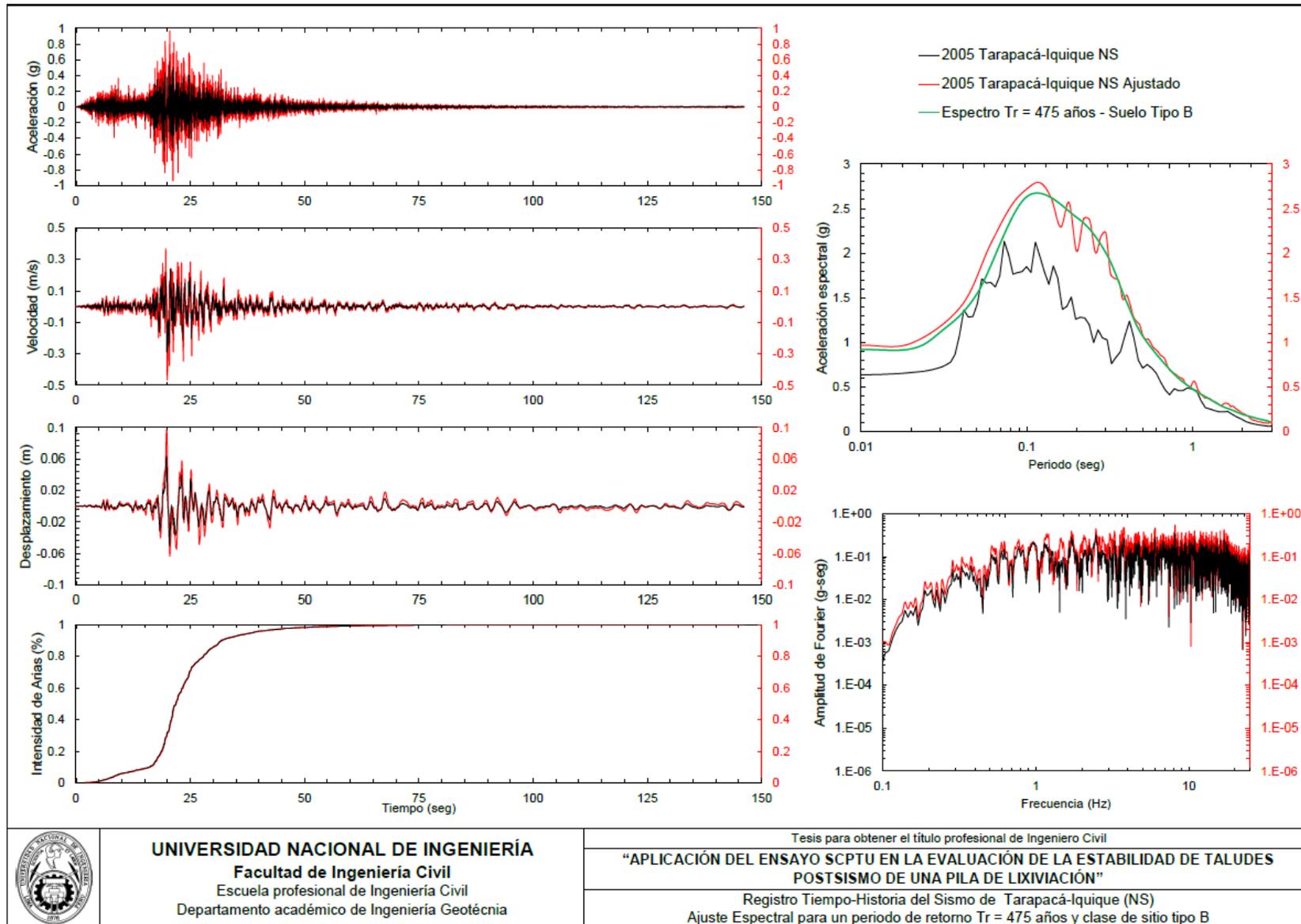
$K(G) > 330$: Soils with significant microstructure (e.g. age/cementation)

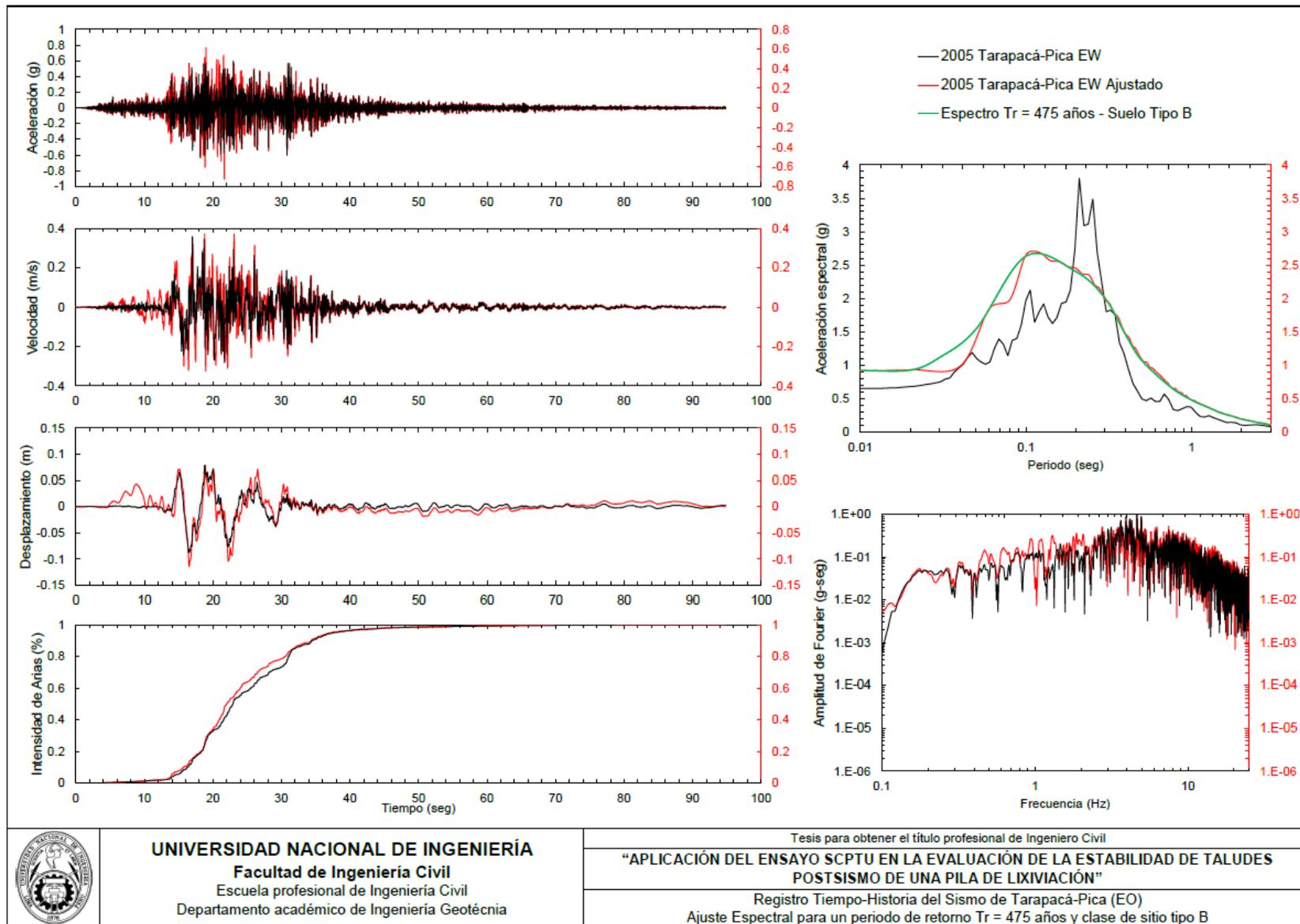
Anexo B - Ajuste espectral a un periodo de retorno 475 años









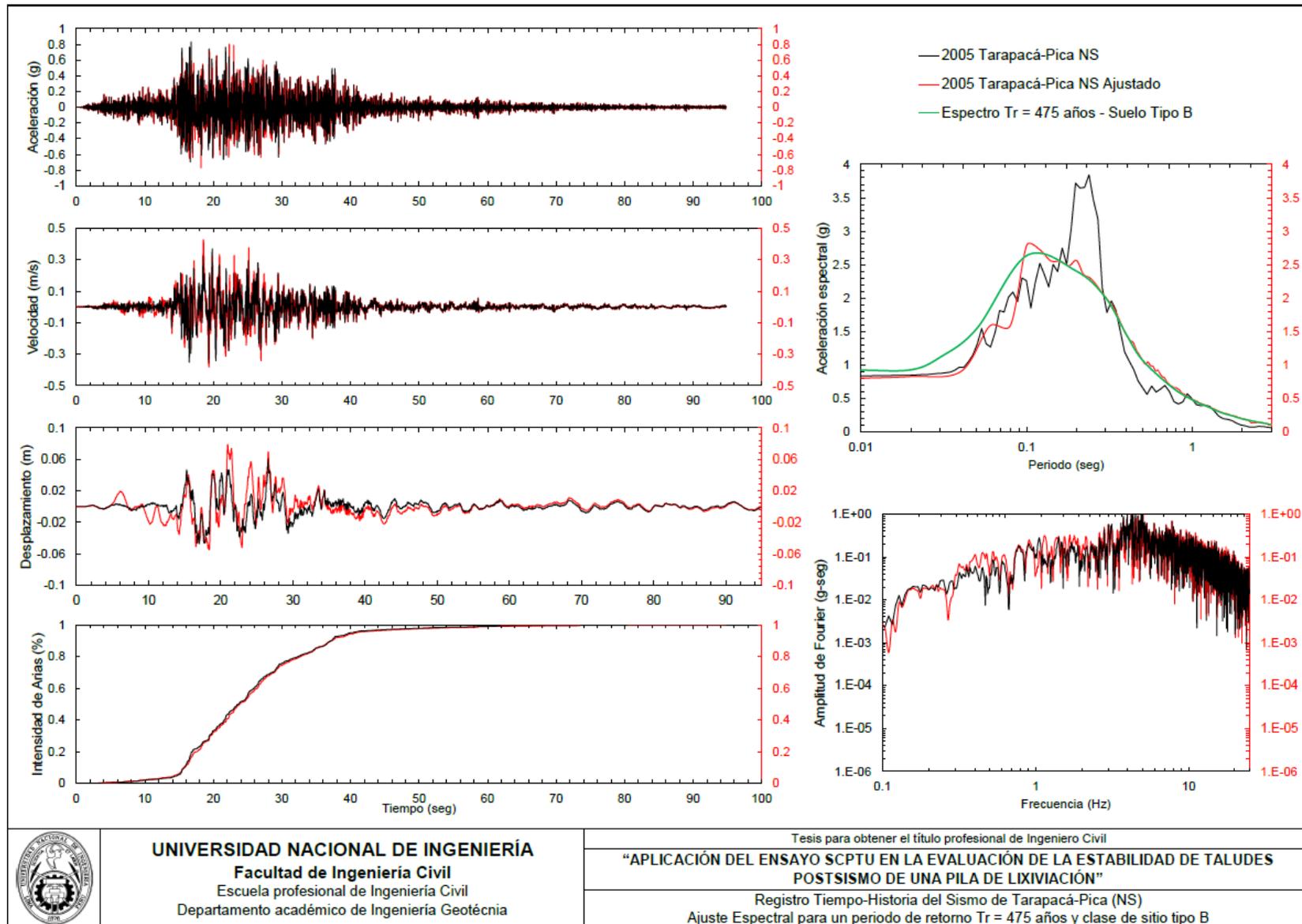


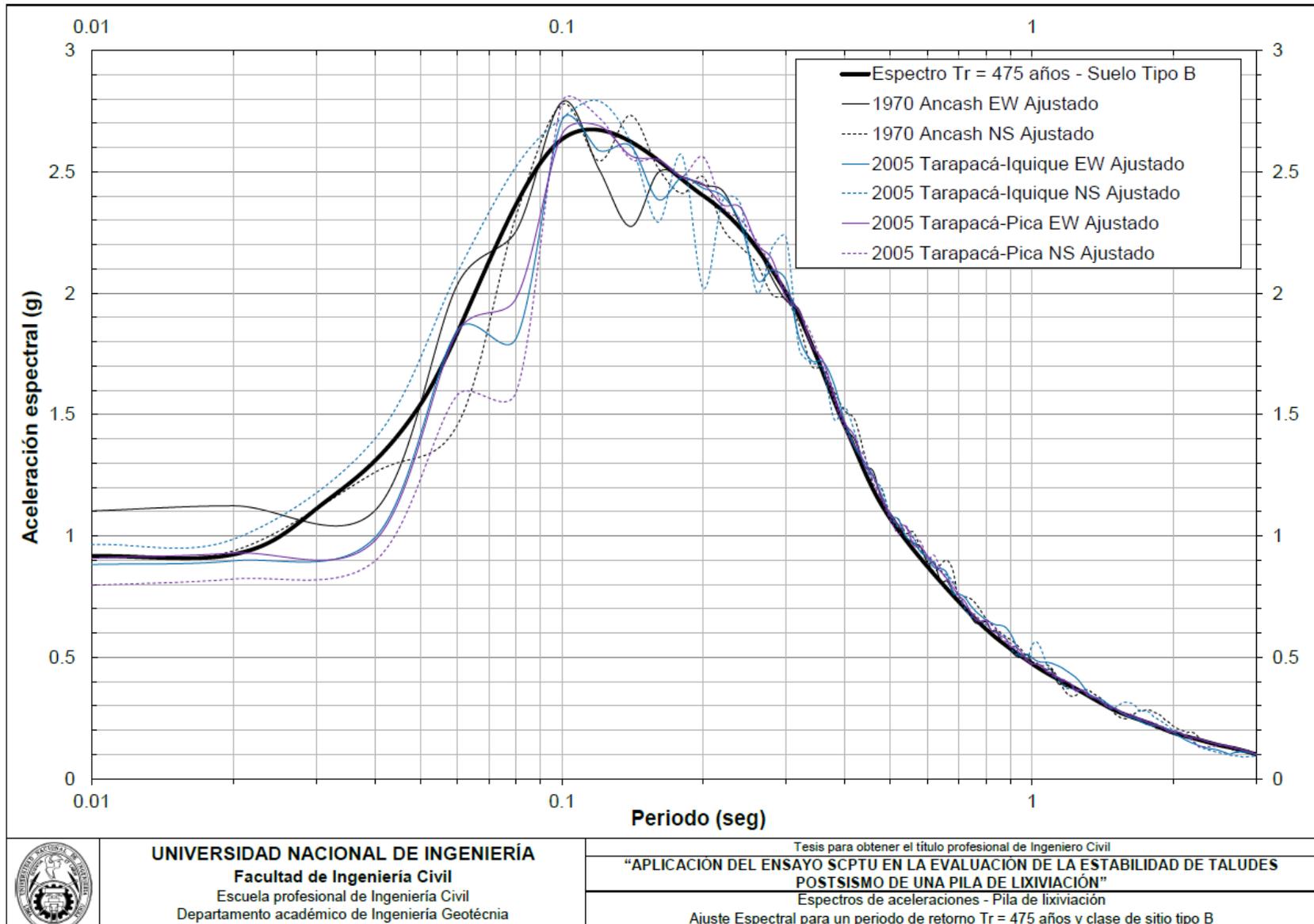
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Civil
Escuela profesional de Ingeniería Civil
Departamento académico de Ingeniería Geotécnica

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

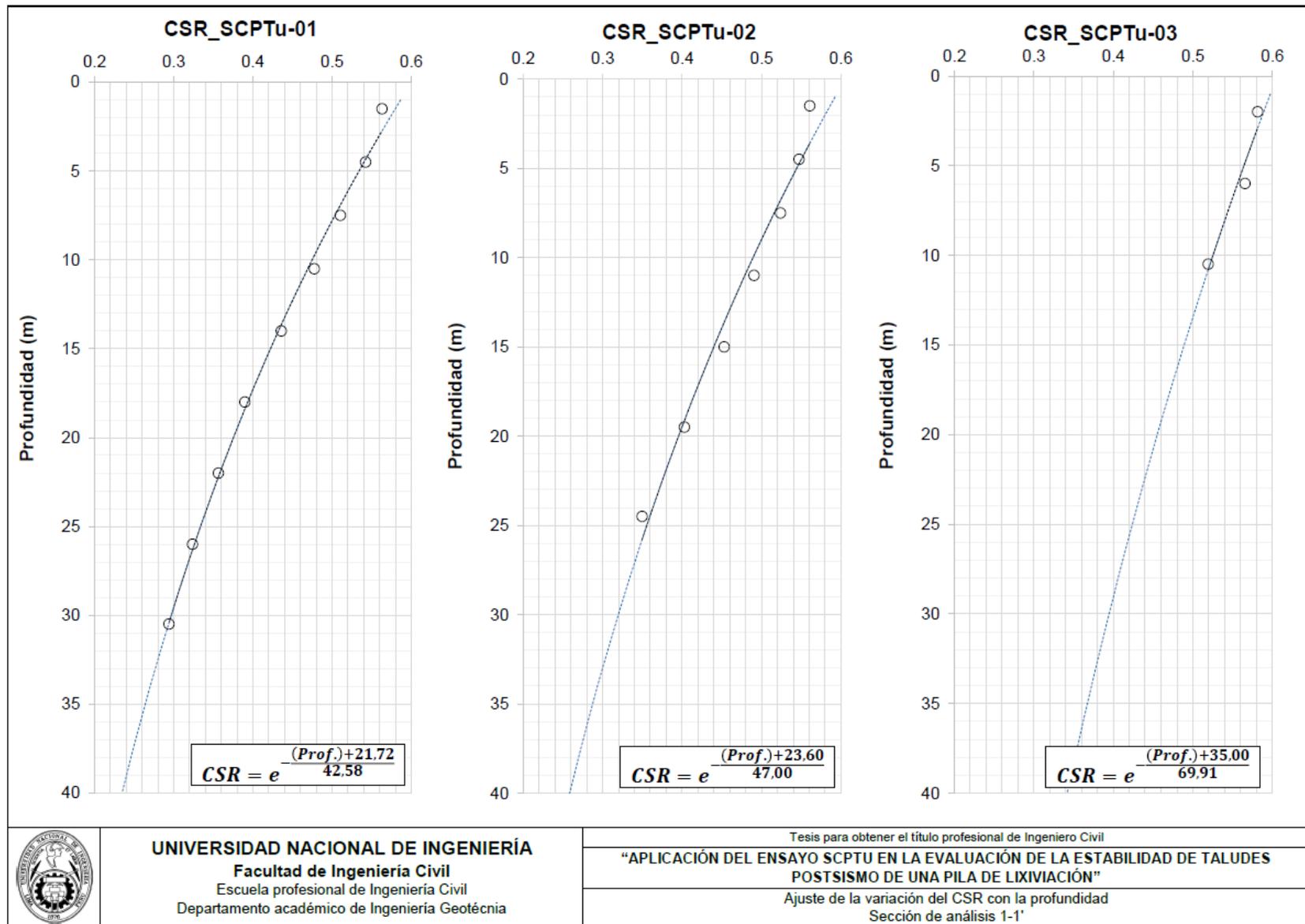
“APLICACIÓN DEL ENSAYO SCPTU EN LA EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES POSTSISMO DE UNA PILA DE LIXIVIACIÓN”

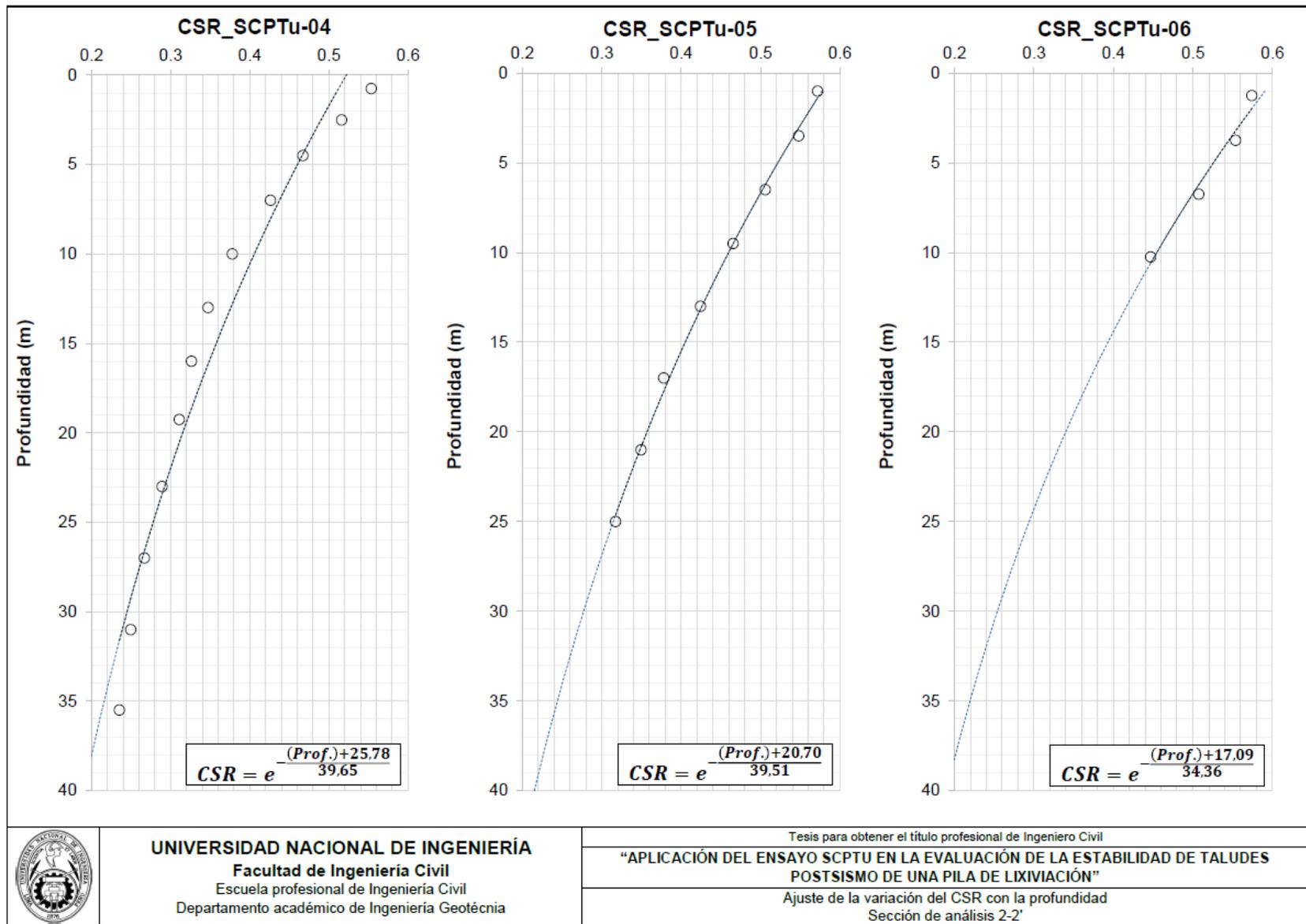
Registro Tiempo-Historia del Sismo de Tarapacá-Pica (EO)
Ajuste Espectral para un periodo de retorno $T_r = 475$ años y clase de sitio tipo B

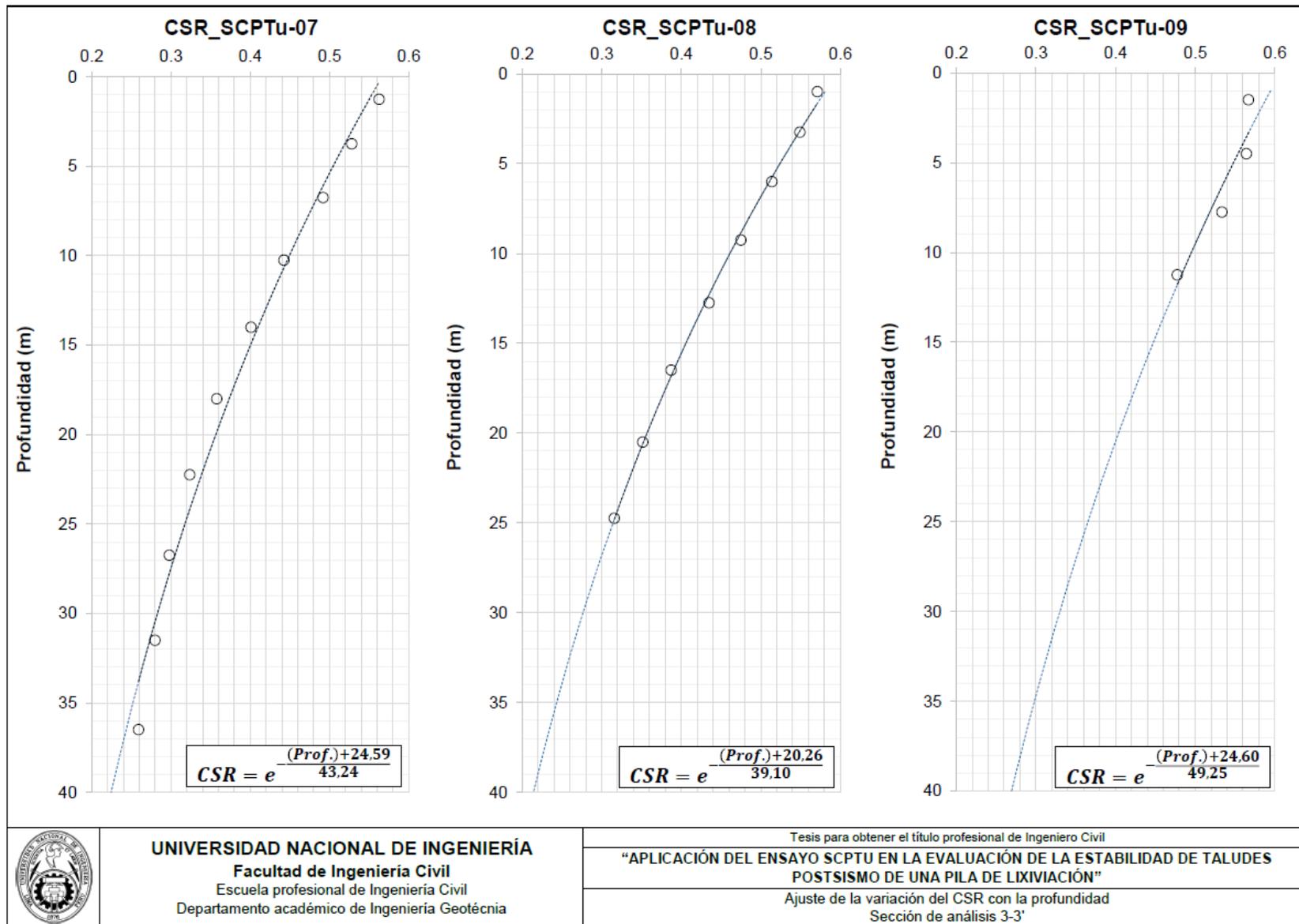




Anexo C - Ajuste de la variación del CSR con la profundidad







Anexo D - Distribución de datos para $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ y S_{uLIQ}/σ'_{v0}

1.0 DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$

1.1 Sección 1-1'

Tabla 1.1
Características de los histogramas - Sección 1-1'

Parámetros de entrada		SCPTu-01	SCPTu-02	SCPTu-03
Cantidad de datos	n	1172	780	40
Cantidad de intervalos	k	12	11	7
Rango	R	0,093	0,093	0,037
Amplitud	A	0,0077	0,0084	0,0053

Tabla 1.2
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 1-1'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-01	0,31	0,013	4,2%	0,29	0,31	0,32
SCPTu-02	0,31	0,013	4,3%	0,30	0,31	0,33
SCPTu-03	0,33	0,009	2,7%	0,32	0,33	0,34

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

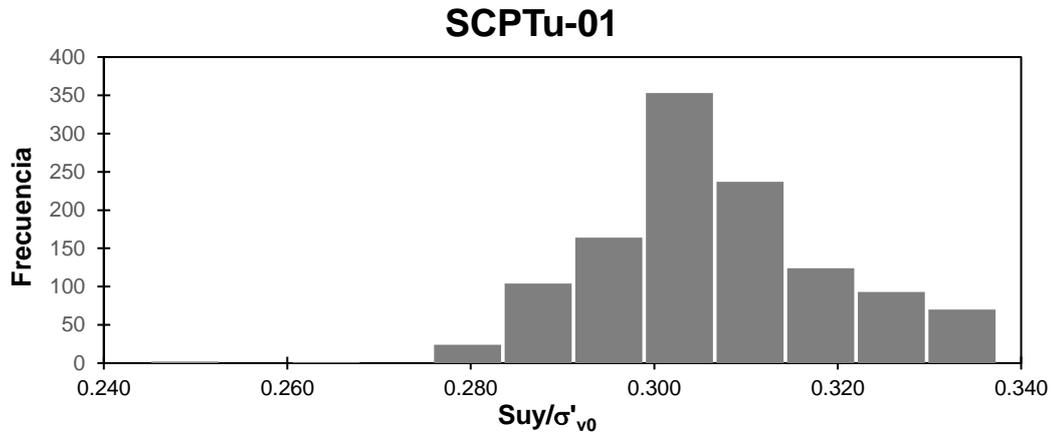
Tabla 1.3
Distribución de datos para asignación de $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ - Sección 1-1'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-01	2,0 - 4,0	0,29	0,30	0,01	3,4%	0,29	0,30	0,32
	10,0 - 12,0	0,30	0,31	0,01	3,3%	0,30	0,31	0,33
	14,0 - 20,0	0,29	0,31	0,01	3,5%	0,30	0,31	0,32
	21,0 - 26,0	0,28	0,30	0,01	3,6%	0,29	0,30	0,31
	27,0 - 33,0	0,25	0,31	0,01	4,1%	0,30	0,30	0,32
SCPTu-02	8,0 - 11,5	0,29	0,31	0,01	3,2%	0,30	0,31	0,32
	14,0 - 27,0	0,25	0,31	0,01	4,5%	0,30	0,31	0,33
SCPTu-03	No presenta zonas dominadas por finos							

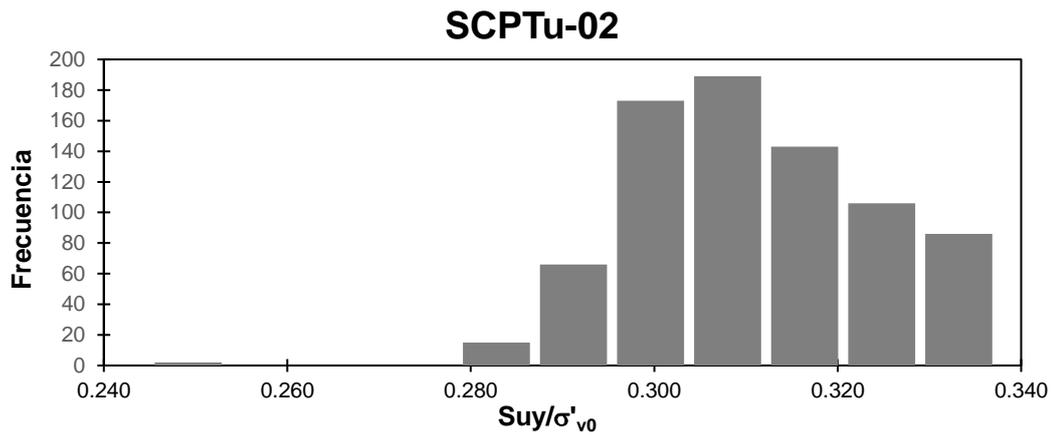
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

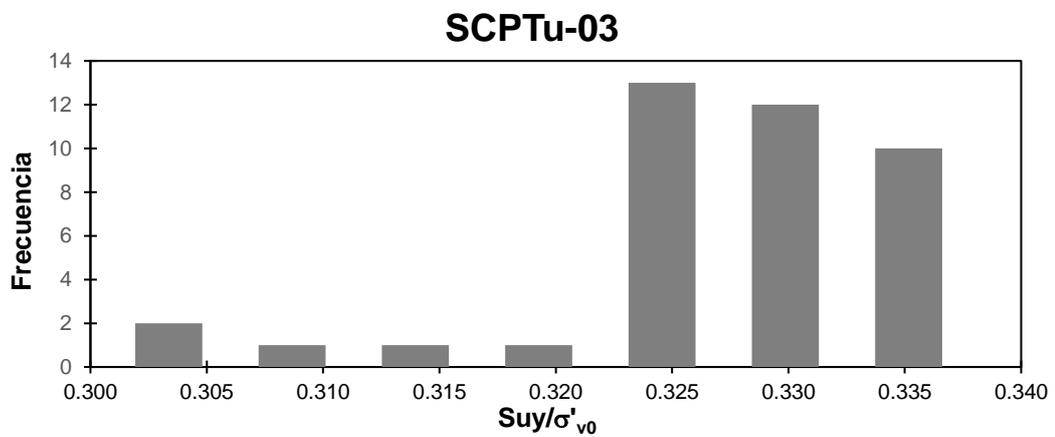
Gráfica 1.1
Histograma del SCPTu-01



Gráfica 1.2
Histograma del SCPTu-02



Gráfica 1.3
Histograma del SCPTu-03



1.2 Sección 2-2'

Tabla 1.4
Características de los histogramas - Sección 2-2'

Parámetros de entrada		SCPTu-04	SCPTu-05	SCPTu-06
Cantidad de datos	n	1400	880	263
Cantidad de intervalos	k	12	11	10
Rango	R	0,09	0,09	0,08
Amplitud	A	0,0077	0,0084	0,0078

Tabla 1.5
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 2-2'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-04	0,31	0,016	5,3%	0,29	0,31	0,32
SCPTu-05	0,30	0,013	4,4%	0,29	0,30	0,32
SCPTu-06	0,32	0,017	5,4%	0,31	0,32	0,33

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

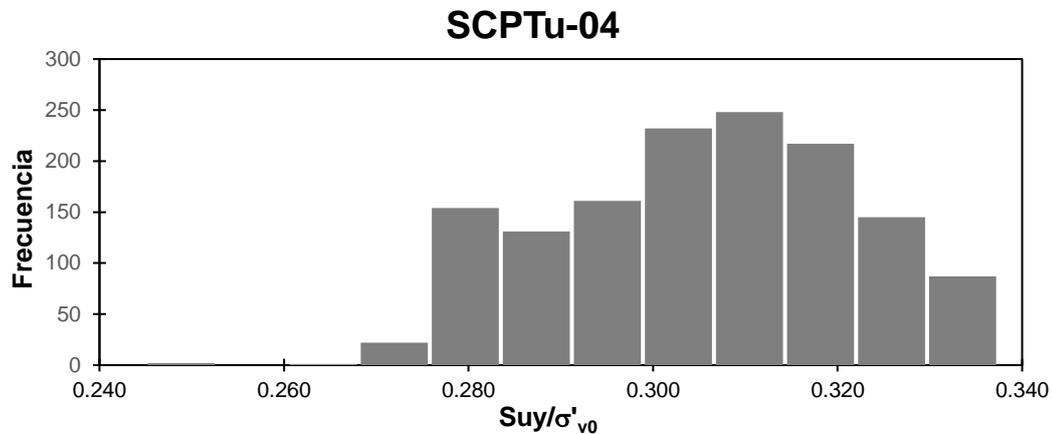
Tabla 1.6
Distribución de datos para asignación de $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ - Sección 2-2'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-04	11,0 - 13,0	0,30	0,32	0,01	2,3%	0,31	0,31	0,32
	21,5 - 26,0	0,29	0,31	0,01	3,2%	0,30	0,30	0,32
	30,0 - 36,0	0,30	0,32	0,01	3,1%	0,31	0,31	0,33
SCPTu-05	15,0 - 20,5	0,28	0,30	0,01	4,1%	0,29	0,30	0,31
	23,5 - 27,0	0,25	0,33	0,03	7,8%	0,33	0,33	0,34
SCPTu-06	No presenta zonas dominadas por finos							

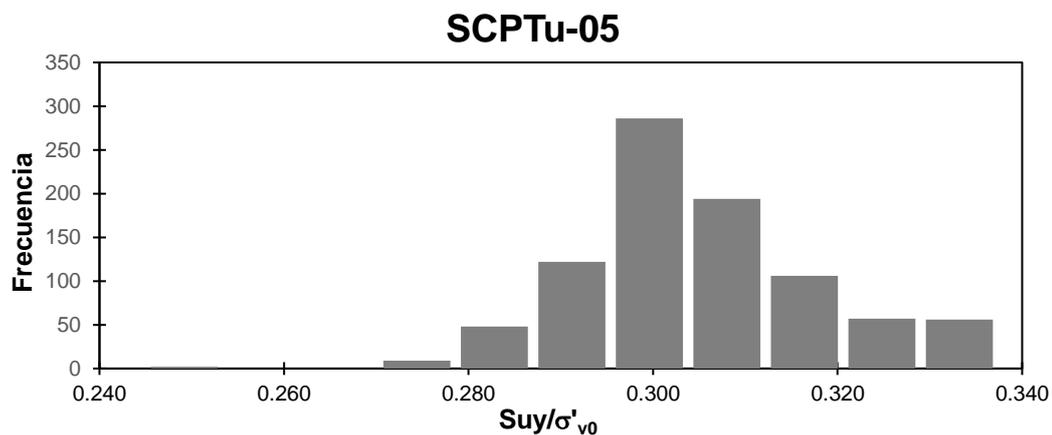
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

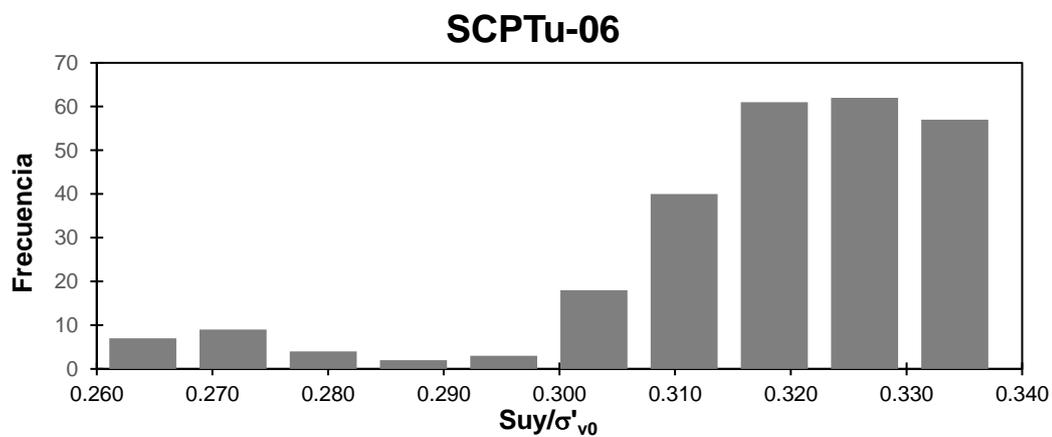
Gráfica 1.4
Histograma del SCPTu-04



Gráfica 1.5
Histograma del SCPTu-05



Gráfica 1.6
Histograma del SCPTu-06



1.3 Sección 3-3'

Tabla 1.7
Características de los histogramas - Sección 3-3'

Parámetros de entrada		SCPTu-07	SCPTu-08	SCPTu-09
Cantidad de datos	n	1354	668	165
Cantidad de intervalos	k	12	11	9
Rango	R	0,09	0,05	0,04
Amplitud	A	0,0077	0,0042	0,0046

Tabla 1.8
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 3-3'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-07	0,31	0,015	4,8%	0,29	0,31	0,32
SCPTu-08	0,31	0,012	3,8%	0,30	0,31	0,33
SCPTu-09	0,32	0,009	3,0%	0,31	0,32	0,33

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

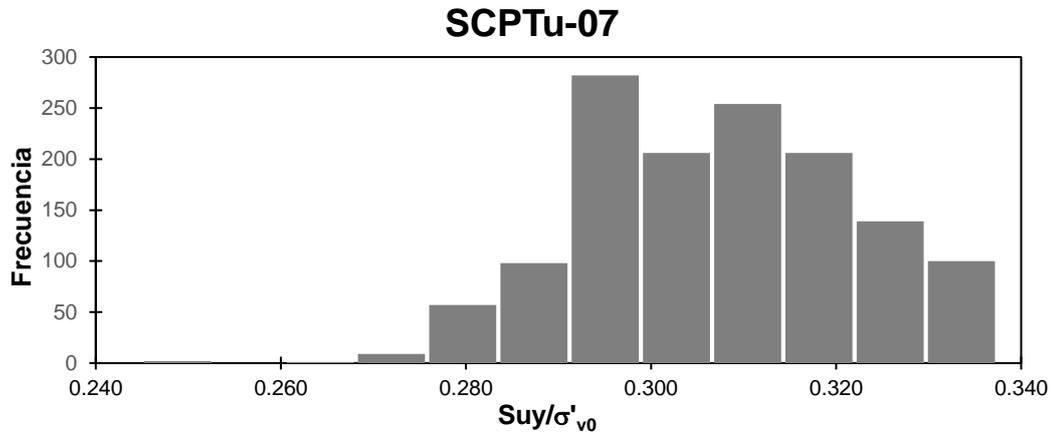
Tabla 1.9
Distribución de datos para asignación de $S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$ - Sección 3-3'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-07	14,0 - 39,0	0,25	0,31	0,01	4,7%	0,29	0,31	0,32
SCPTu-08	4,0 - 11,5	0,29	0,32	0,01	4,1%	0,30	0,32	0,33
	13,5 - 27,0	0,29	0,31	0,01	3,4%	0,30	0,31	0,32
SCPTu-09	9,5 - 11,5	0,30	0,32	0,01	2,7%	0,31	0,32	0,33

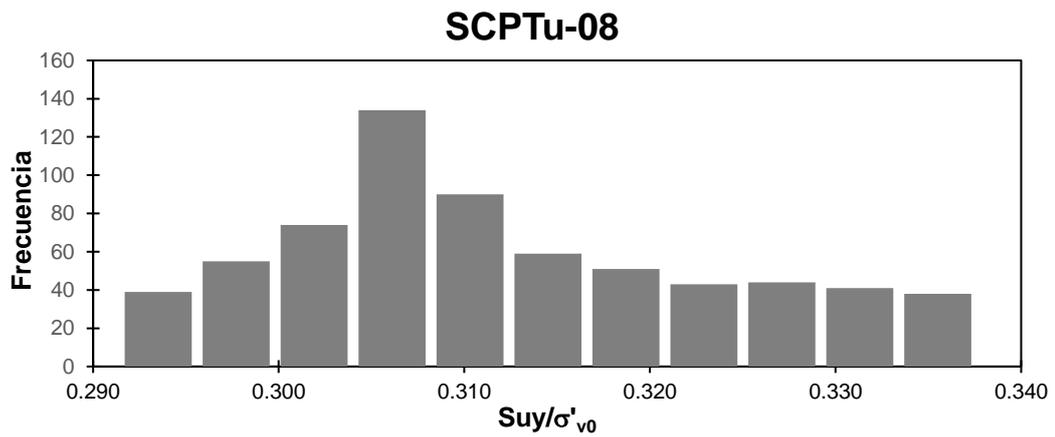
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

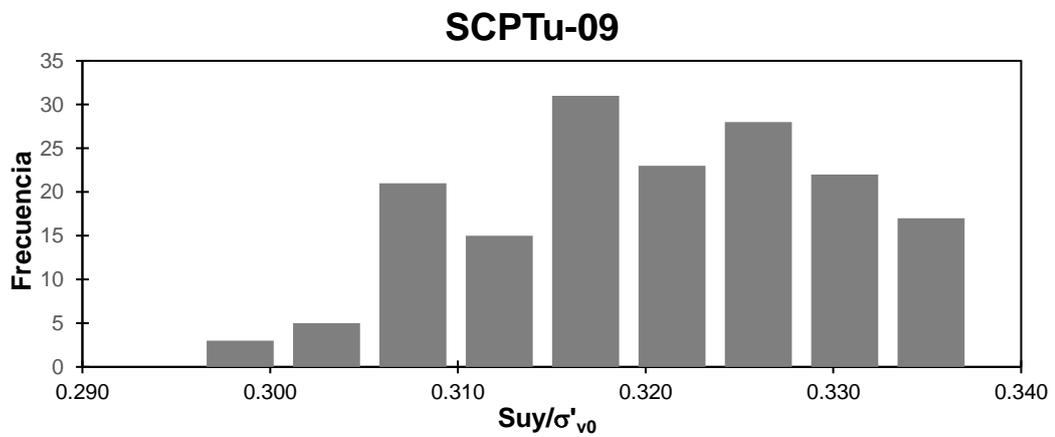
Gráfica 1.7
Histograma del SCPTu-07



Gráfica 1.8
Histograma del SCPTu-08



Gráfica 1.9
Histograma del SCPTu-09



2.0 DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA S_{uLiq}/σ'_{v0}

2.1 Sección 1-1'

Tabla 2.1
Características de los histogramas - Sección 1-1'

Parámetros de entrada		SCPTu-01	SCPTu-02	SCPTu-03
Cantidad de datos	n	1316	1076	520
Cantidad de intervalos	k	12	12	11
Rango	R	0,437	0,606	0,690
Amplitud	A	0,0364	0,0505	0,0627

Tabla 2.2
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 1-1'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-01	0,27	0,070	26,2%	0,20	0,27	0,32
SCPTu-02	0,30	0,095	31,7%	0,21	0,30	0,39
SCPTu-03	0,30	0,087	28,6%	0,23	0,29	0,40

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

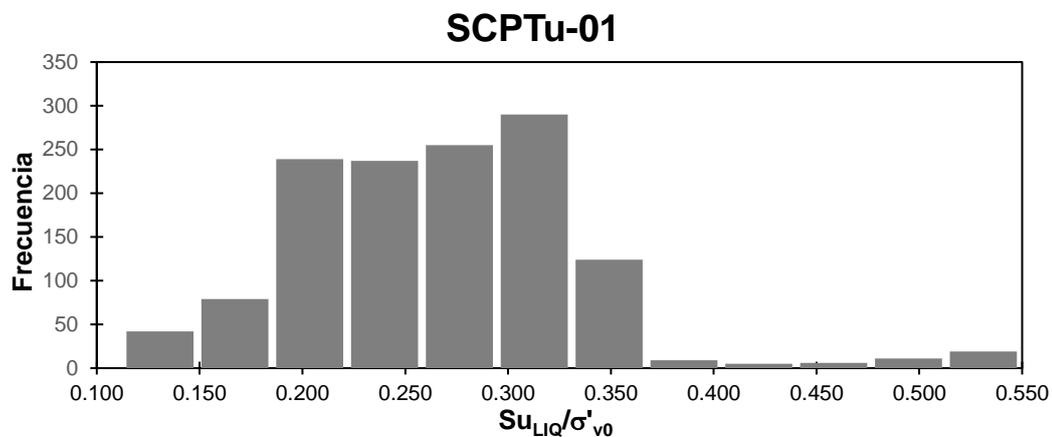
Tabla 2.3
Distribución de datos para asignación de S_{uLiq}/σ'_{v0} - Sección 1-1'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-01	6,5 - 7,5	0,12	0,18	0,04	20,7%	0,14	0,19	0,22
	13,0 - 14,0	0,16	0,20	0,02	12,0%	0,17	0,19	0,22
	20,0 - 21,0	0,11	0,17	0,05	30,9%	0,12	0,16	0,23
SCPTu-02	5,5 - 7,0	0,16	0,19	0,03	13,6%	0,17	0,19	0,21
	11,5 - 14,5	0,09	0,18	0,05	26,7%	0,12	0,19	0,22
SCPTu-03	No presenta zonas licuables							

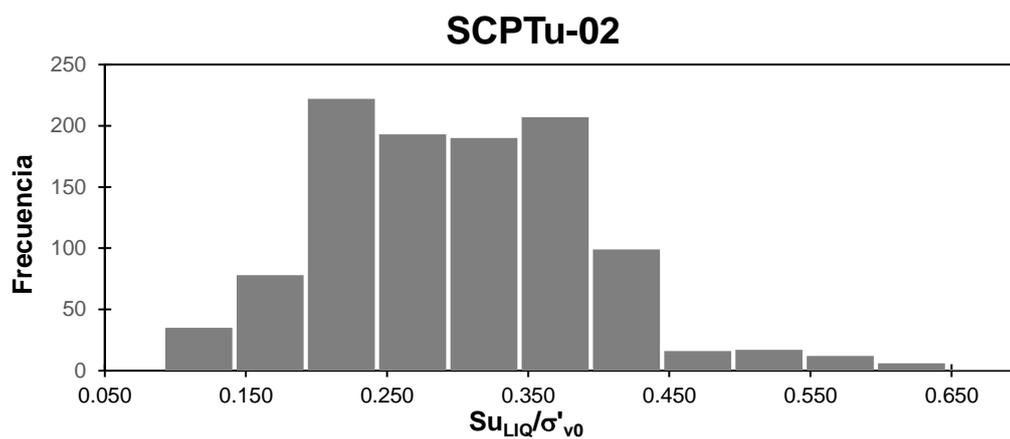
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

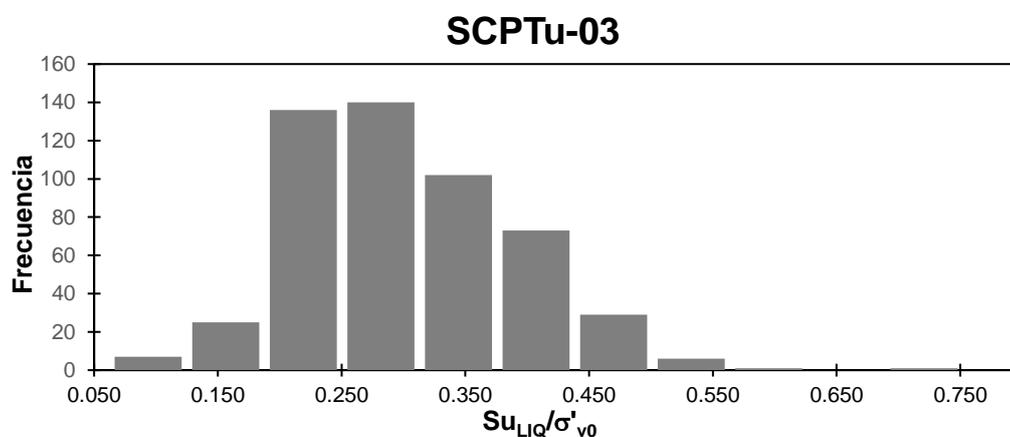
Gráfica 2.1
Histograma del SCPTu-01



Gráfica 2.2
Histograma del SCPTu-02



Gráfica 2.3
Histograma del SCPTu-03



2.2 Sección 2-2'

Tabla 2.4
Características de los histogramas - Sección 2-2'

Parámetros de entrada		SCPTu-04	SCPTu-05	SCPTu-06
Cantidad de datos	n	1517	1036	480
Cantidad de intervalos	k	12	12	10
Rango	R	0,52	0,41	0,40
Amplitud	A	0,0436	0,0341	0,0398

Tabla 2.5
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 2-2'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-04	0,28	0,082	29,2%	0,20	0,29	0,34
SCPTu-05	0,28	0,070	25,4%	0,22	0,26	0,31
SCPTu-06	0,26	0,090	34,2%	0,18	0,25	0,37

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

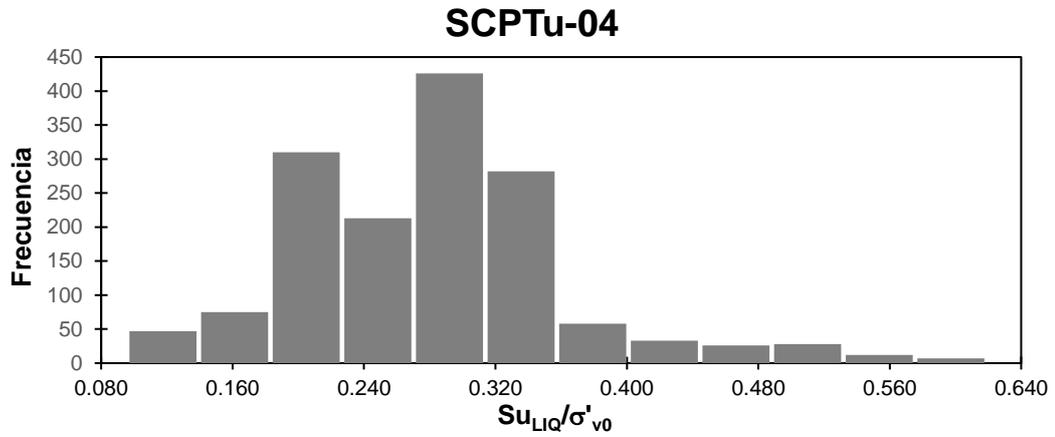
Tabla 2.6
Distribución de datos para asignación de S_{uLIQ}/σ'_{v0} - Sección 2-2'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-04	4,5 - 9,0	0,10	0,18	0,04	22,4%	0,13	0,19	0,22
	13,0 - 14,0	0,17	0,21	0,02	11,2%	0,19	0,21	0,22
SCPTu-05	11,5 - 14,0	0,12	0,20	0,03	14,4%	0,18	0,22	0,22
SCPTu-06	1,0 - 2,0	0,08	0,14	0,06	39,0%	0,10	0,13	0,18
	6,0 - 7,0	0,11	0,16	0,03	20,1%	0,12	0,16	0,18

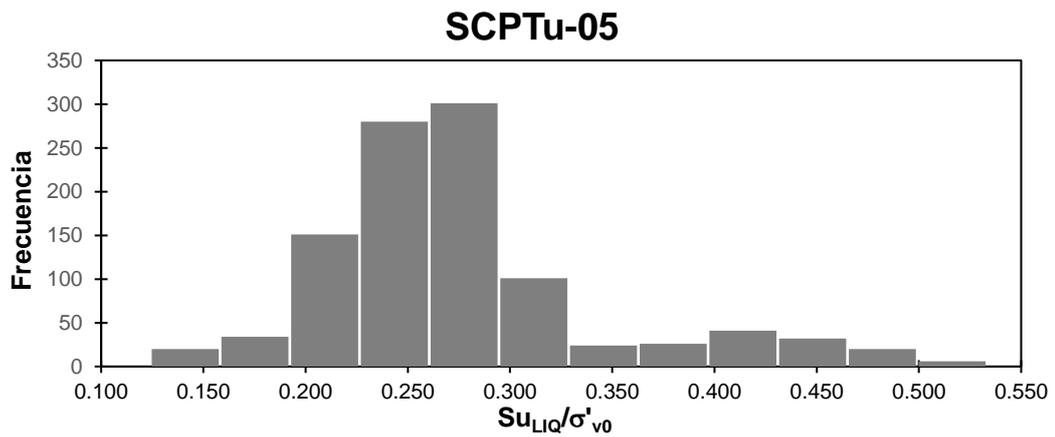
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

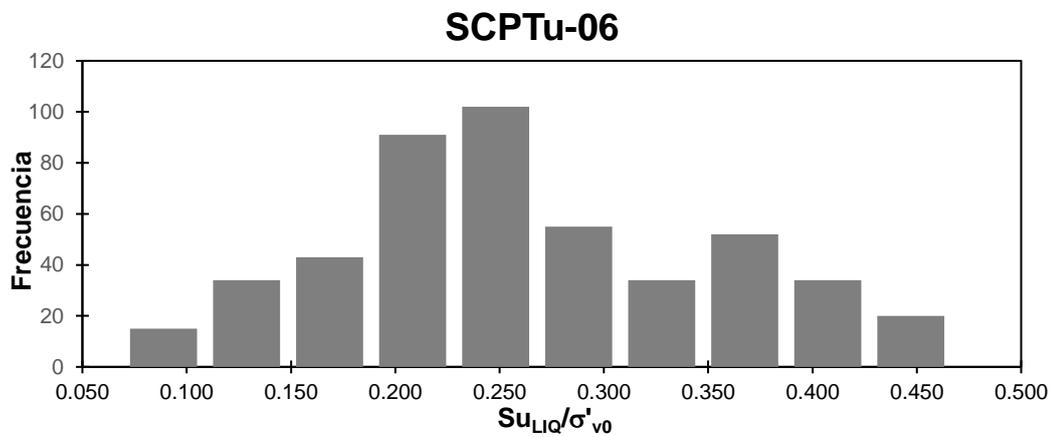
Gráfica 2.4
Histograma del SCPTu-04



Gráfica 2.5
Histograma del SCPTu-05



Gráfica 2.6
Histograma del SCPTu-06



2.3 Sección 3-3'

Tabla 2.7
Características de los histogramas - Sección 3-3'

Parámetros de entrada		SCPTu-07	SCPTu-08	SCPTu-09
Cantidad de datos	n	1557	1080	520
Cantidad de intervalos	k	12	12	11
Rango	R	0,42	0,45	0,55
Amplitud	A	0,0354	0,0376	0,05

Tabla 2.8
Registros representativos de todo el perfil de los SCPTu - Sección 3-3'

Ensayo	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-07	0,24	0,058	24,1%	0,18	0,24	0,30
SCPTu-08	0,27	0,065	24,7%	0,20	0,26	0,33
SCPTu-09	0,26	0,074	28,7%	0,19	0,25	0,34

Abreviaturas:

μ : media. σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación.
P16: percentil 16. P50: percentil 50. P84: percentil 84.

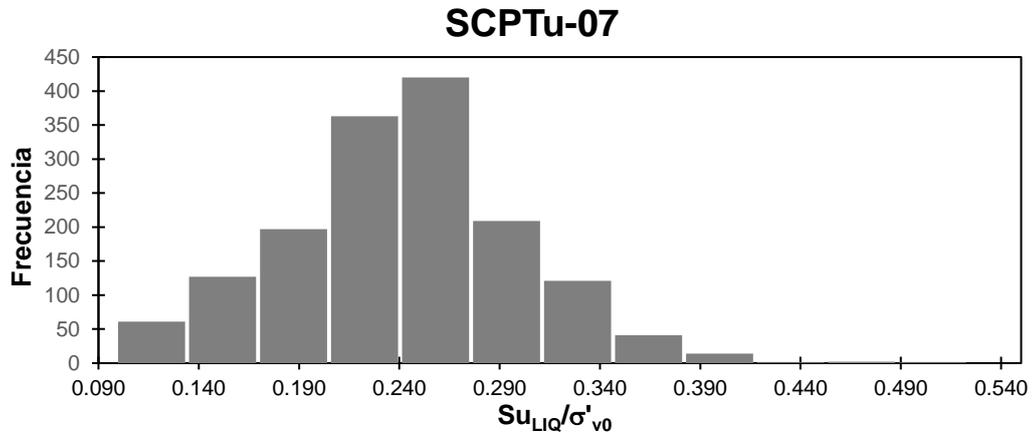
Tabla 2.9
Distribución de datos para asignación de S_{uLIQ}/σ'_{v0} - Sección 3-3'

Ensayo	Prof. (m)	mín	μ	σ	C.V.	P16	P50	P84
SCPTu-07	2,0 - 3,0	0,13	0,18	0,03	17,0%	0,14	0,18	0,22
	4,0 - 8,0	0,12	0,17	0,04	21,4%	0,15	0,17	0,18
	14,5 - 17,0	0,10	0,18	0,04	25,4%	0,12	0,19	0,22
	26,0 - 27,0	0,12	0,20	0,06	29,2%	0,13	0,21	0,24
	36,0 - 37,0	0,22	0,26	0,04	13,5%	0,23	0,25	0,30
SCPTu-08	7,0 - 9,0	0,10	0,18	0,03	18,6%	0,15	0,17	0,21
	14,5 - 15,5	0,16	0,20	0,03	12,8%	0,17	0,21	0,23
	21,0 - 22,5	0,12	0,18	0,03	18,5%	0,15	0,18	0,22
SCPTu-09	10,0 - 11,5	0,17	0,19	0,01	7,7%	0,17	0,18	0,20

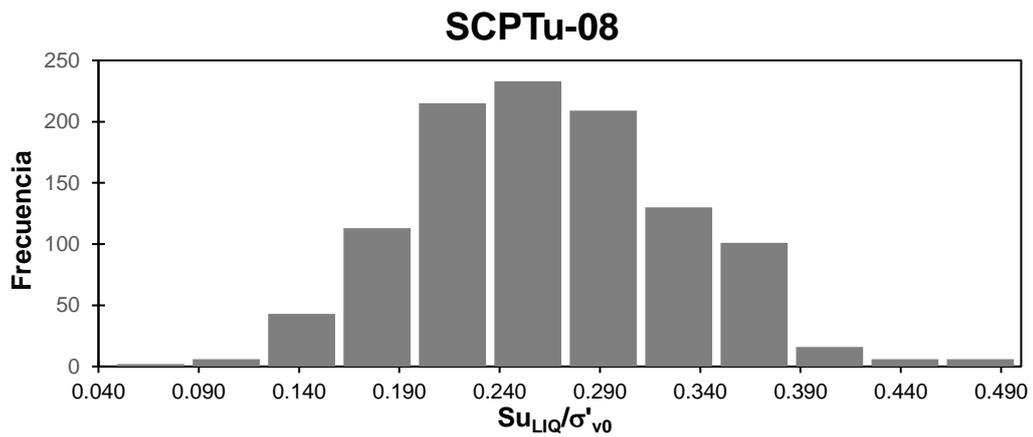
Abreviaturas:

Prof.: profundidad. mín: mínimo. μ : media.
 σ : desviación estándar. C.V.: coeficiente de variación. P16: percentil 16.
P50: percentil 50. P84: percentil 84.

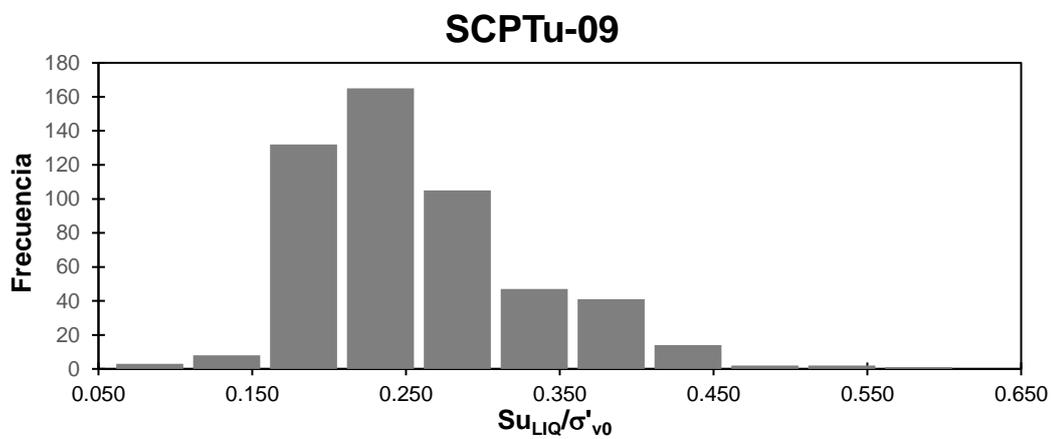
Gráfica 2.7
Histograma del SCPTu-07



Gráfica 2.8
Histograma del SCPTu-08



Gráfica 2.9
Histograma del SCPTu-09



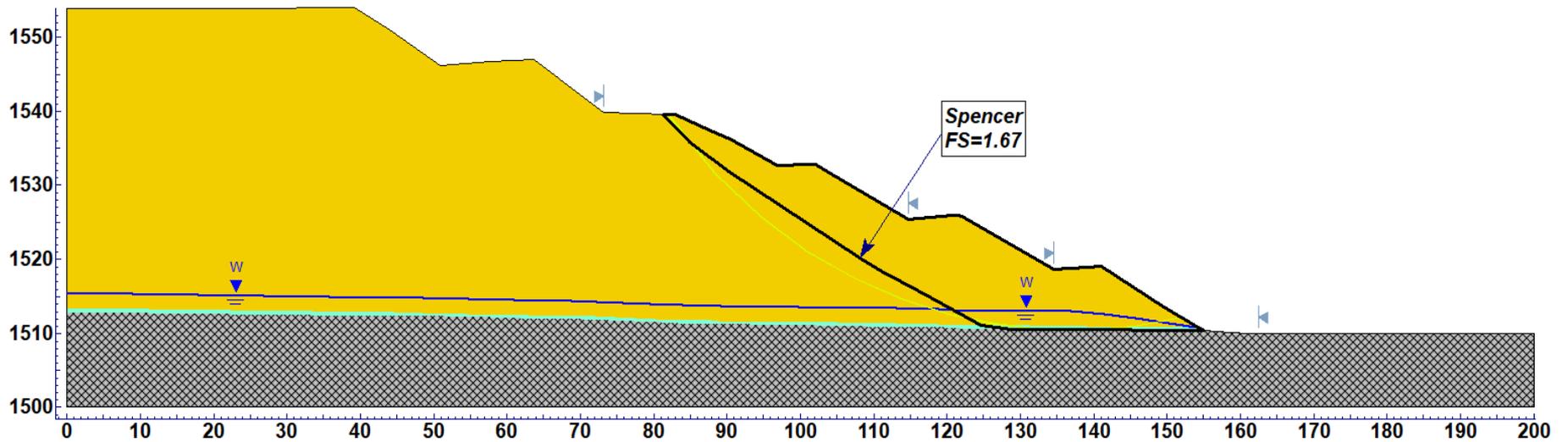
Anexo E - Análisis de estabilidad de taludes en la pila de lixiviación

Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,67

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

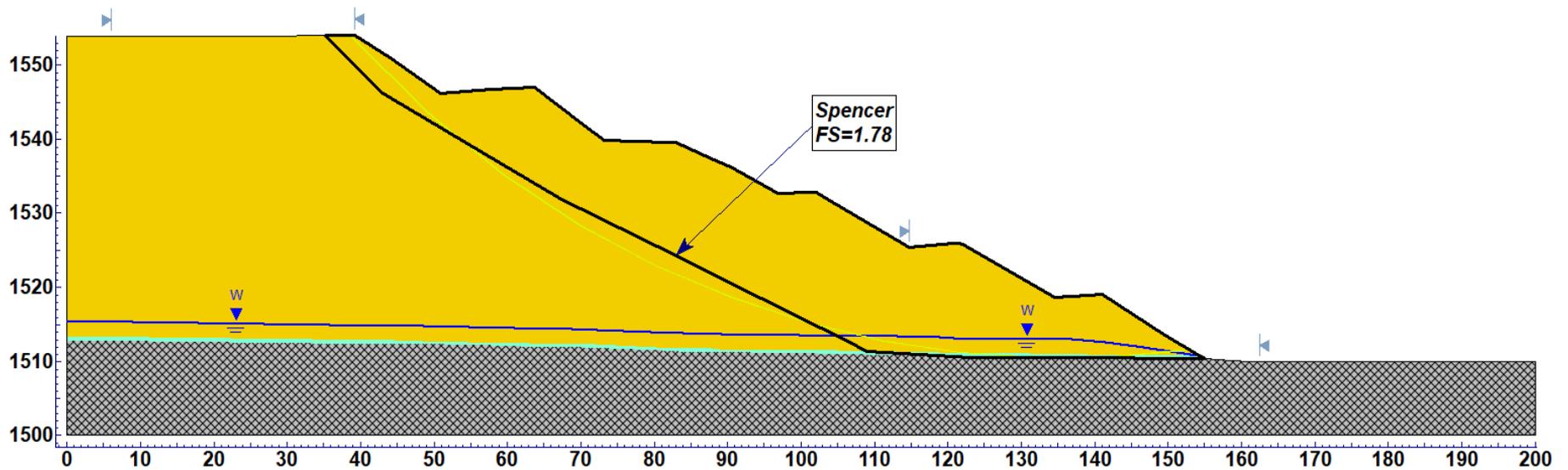


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,78

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

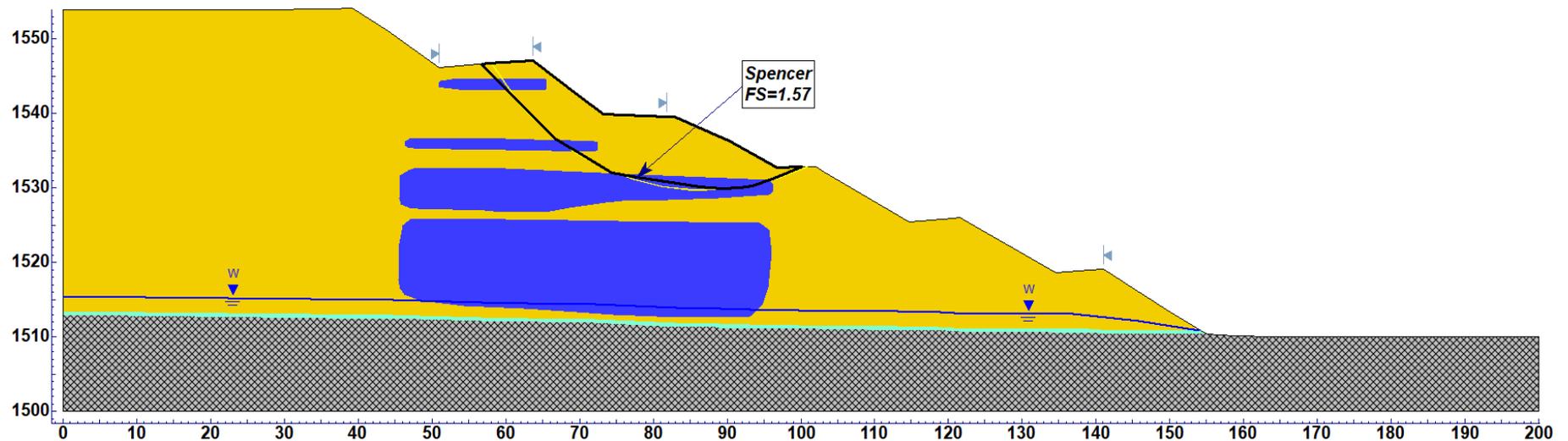


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,57

Materiales	γ_{tot}	c'	ϕ'	S_u/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,34
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

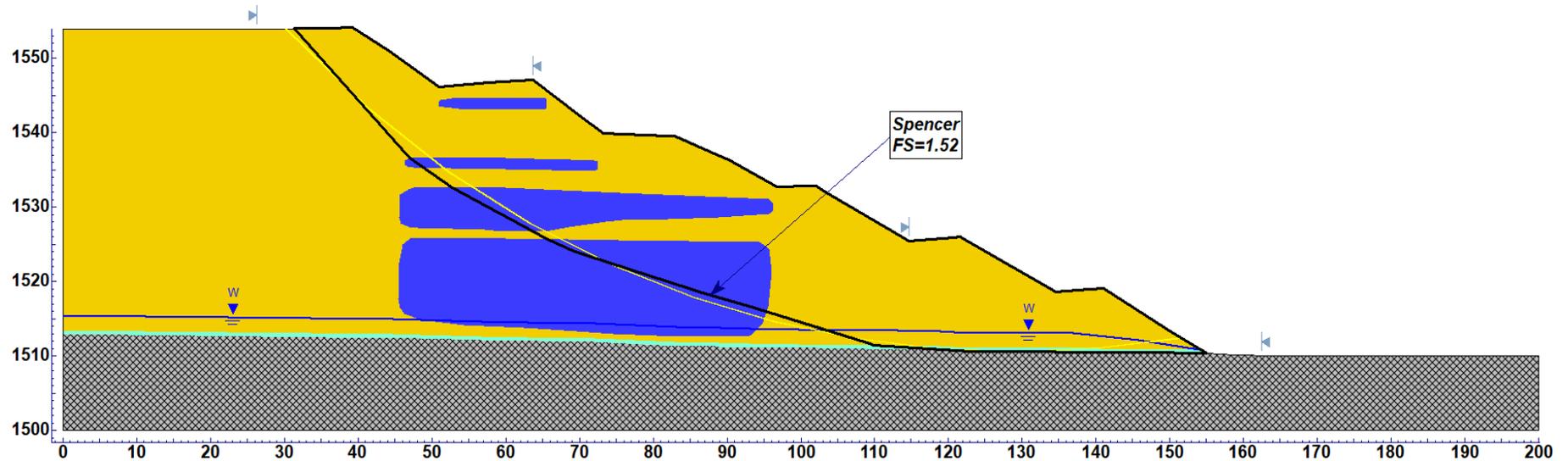


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,52

Materiales	γ_{tot}	c'	ϕ'	S_u/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,34
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

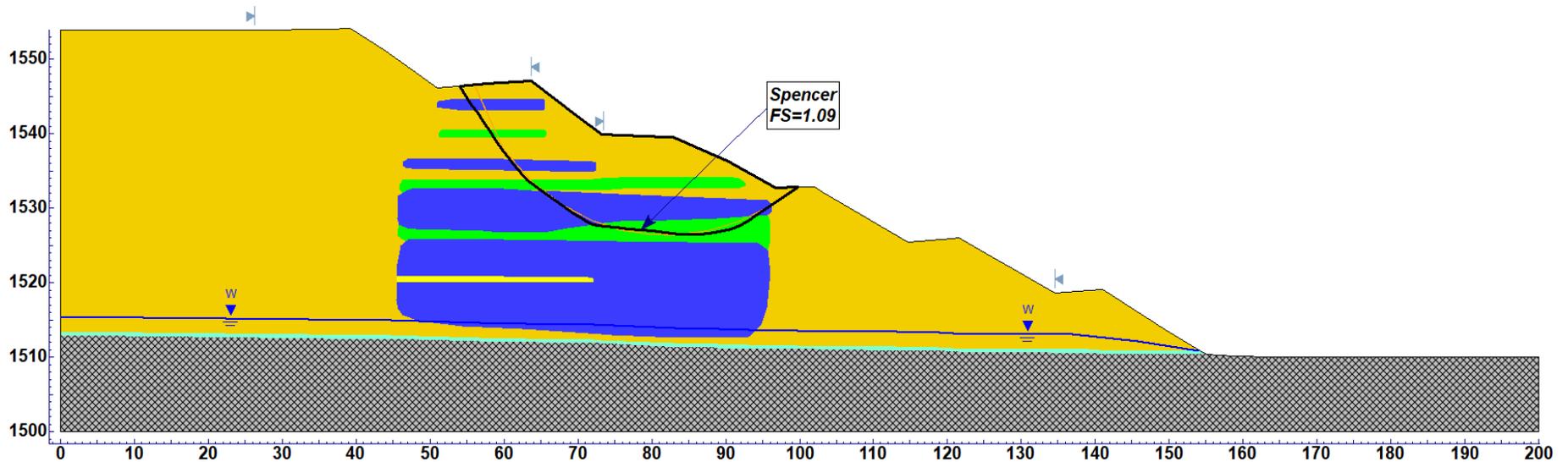


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,09

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$Su(yield)/\sigma'_{v0}$	$SuLIQ/\sigma'_{v0}$
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.

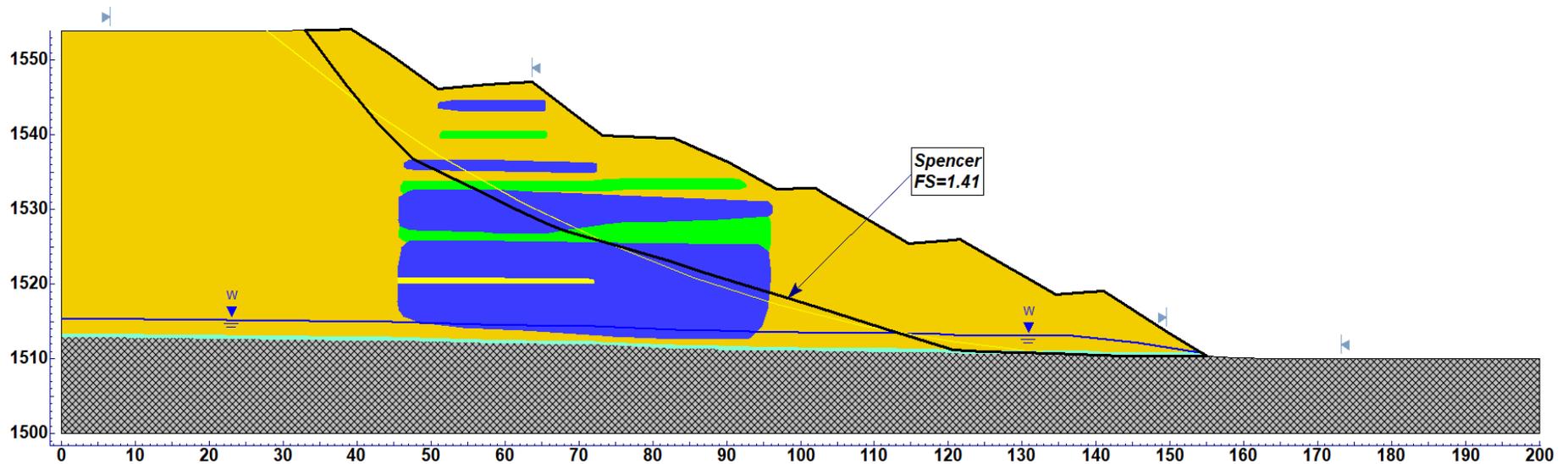


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 1-1' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,41

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$Su(yield)/\sigma'_{v0}$	$SuLIQ/\sigma'_{v0}$
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.

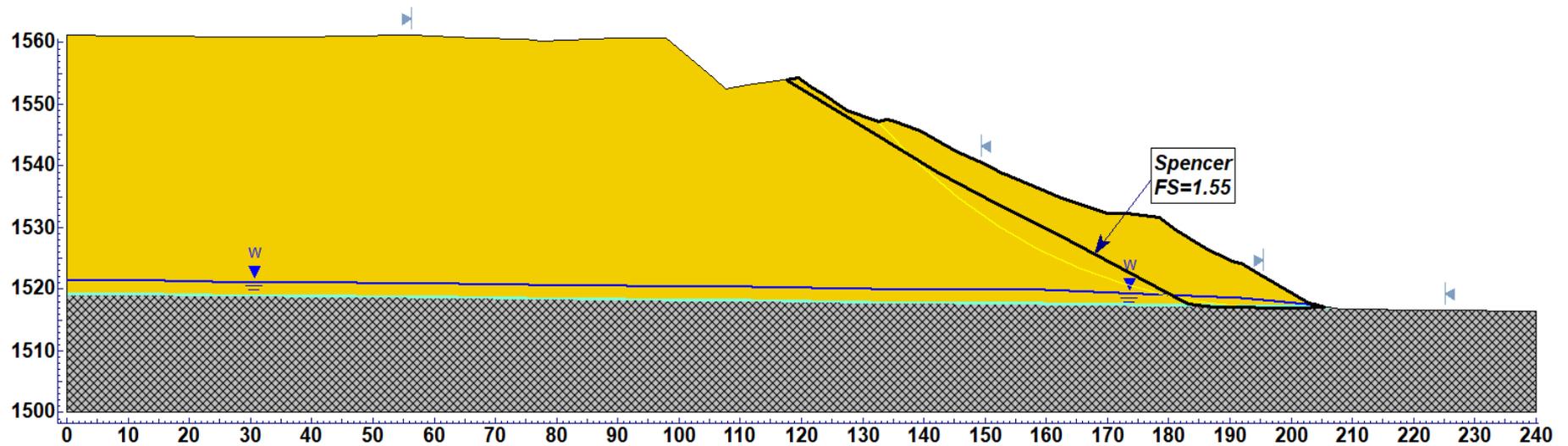


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,55

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

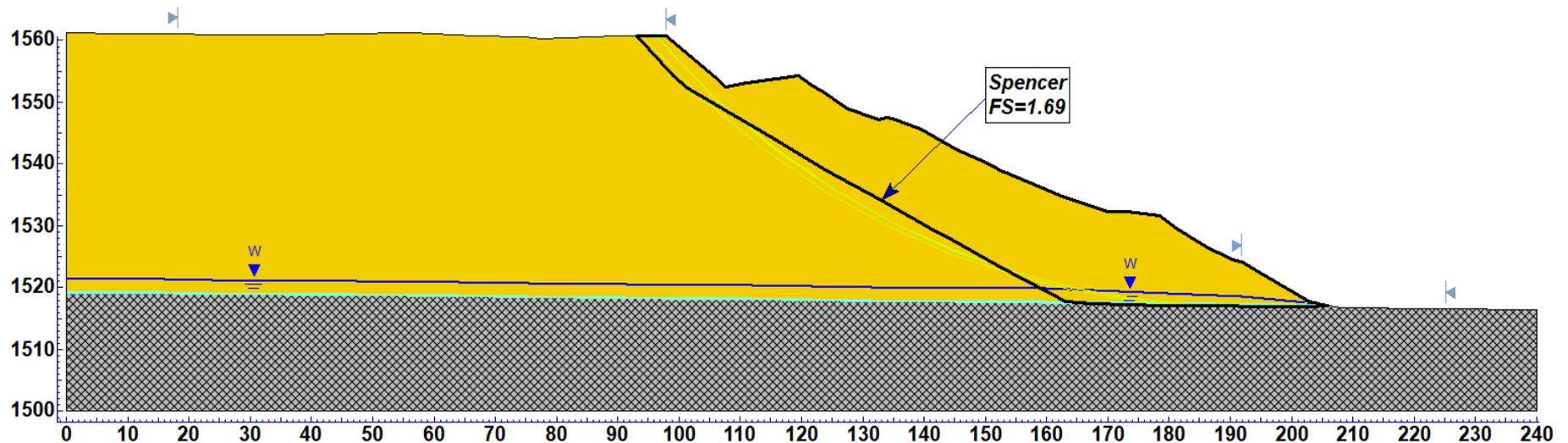


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,69

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

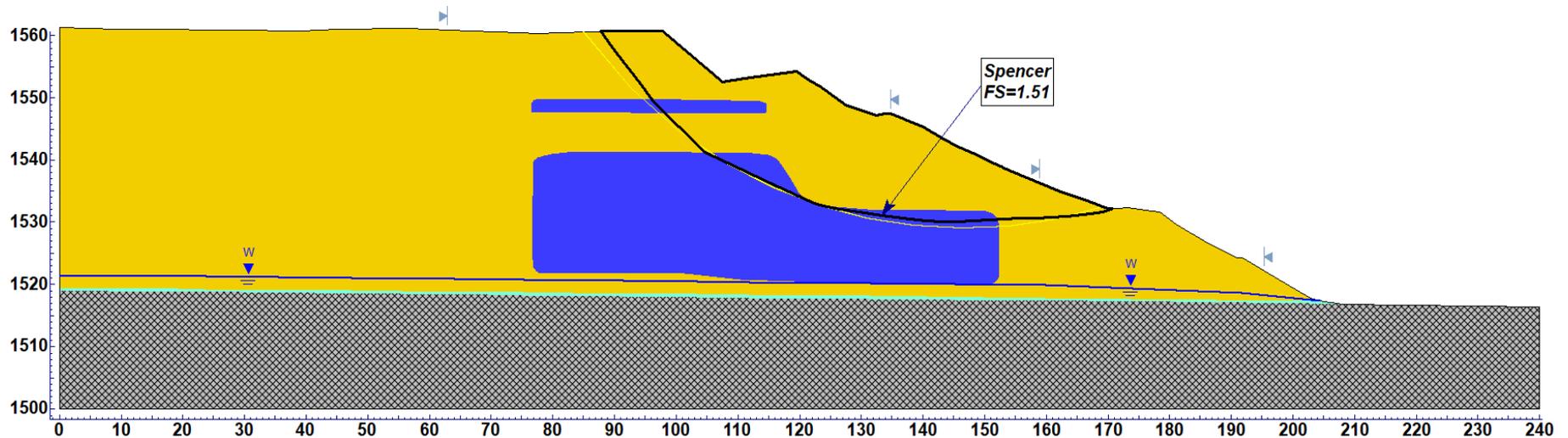


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,51

Materiales	γ_{tot}	c'	ϕ'	S_u/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,35
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

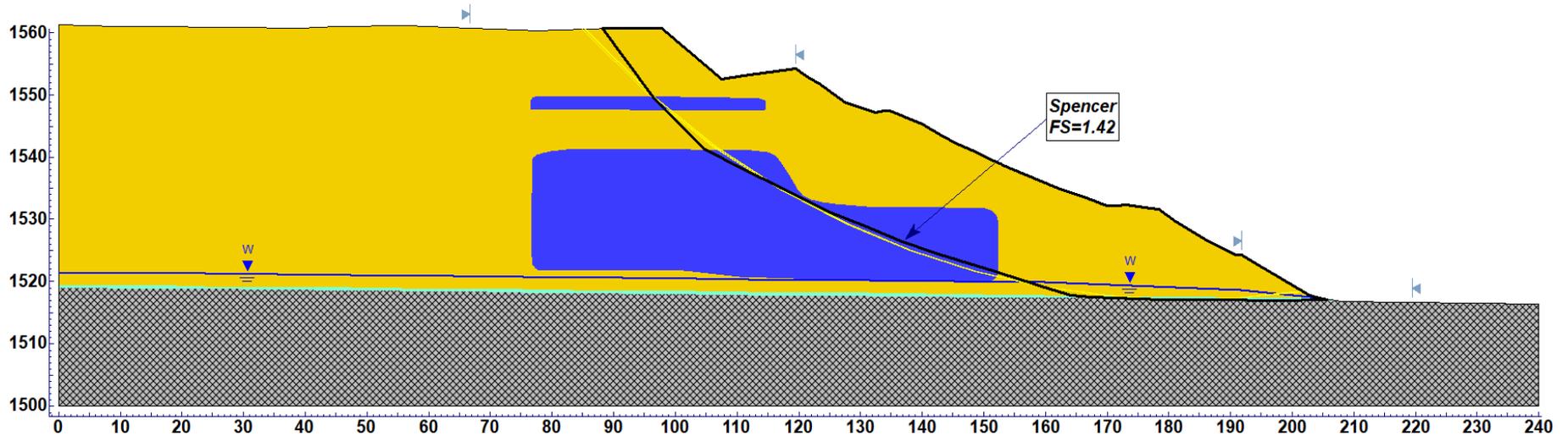


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,42

Materiales	γ_{tot}	c'	ϕ'	S_u/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,35
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

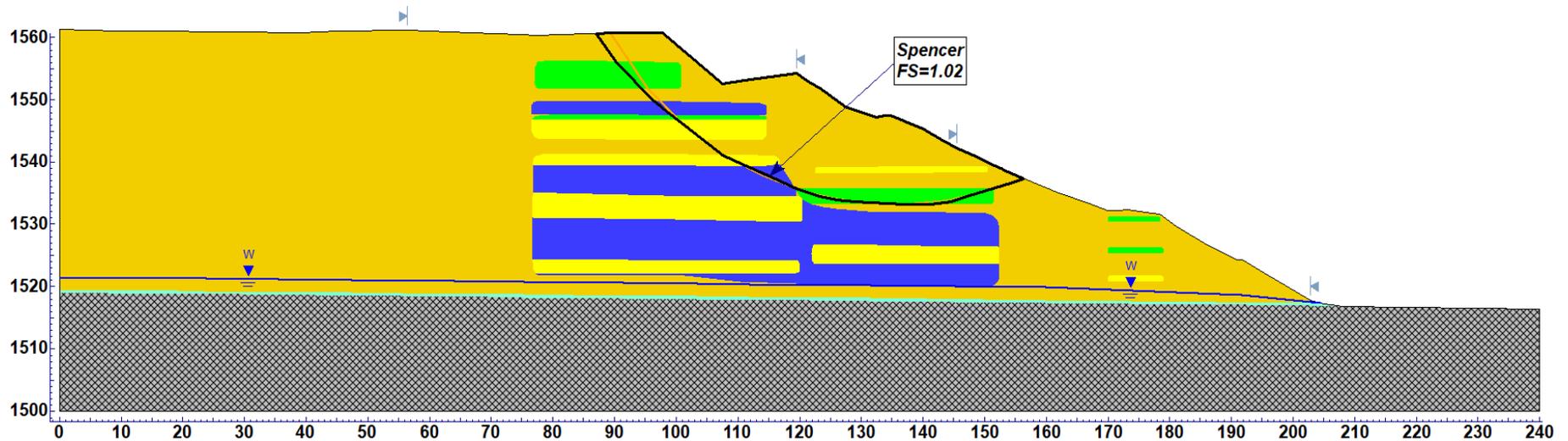


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,02

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$Su(yield)/\sigma'_{v0}$	$SuLIQ/\sigma'_{v0}$
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.

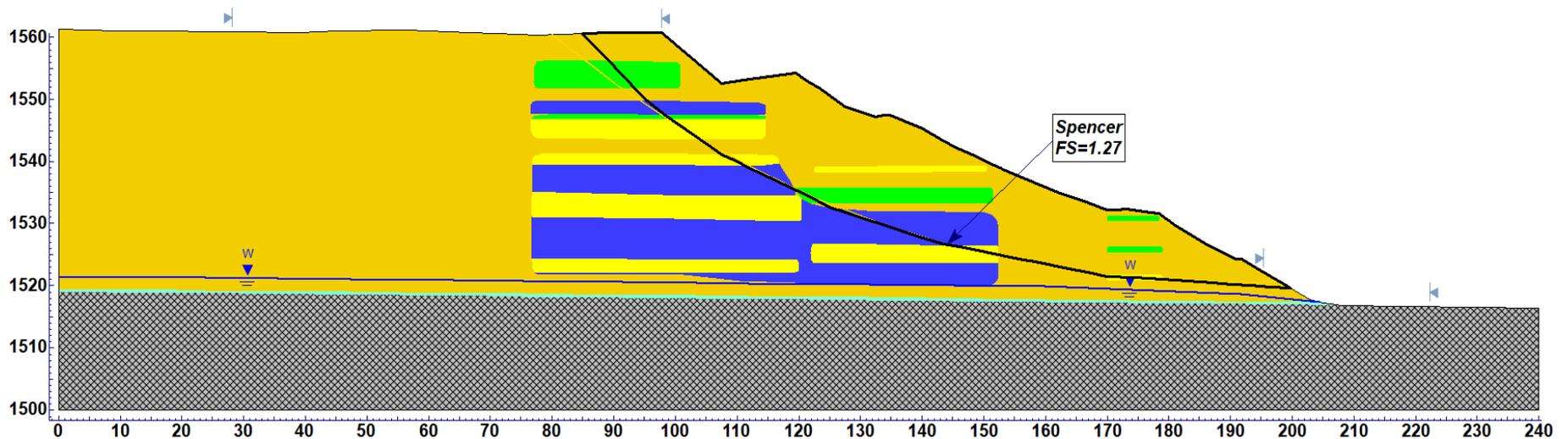


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 2-2' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,27

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$	S_{uLIQ}/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.

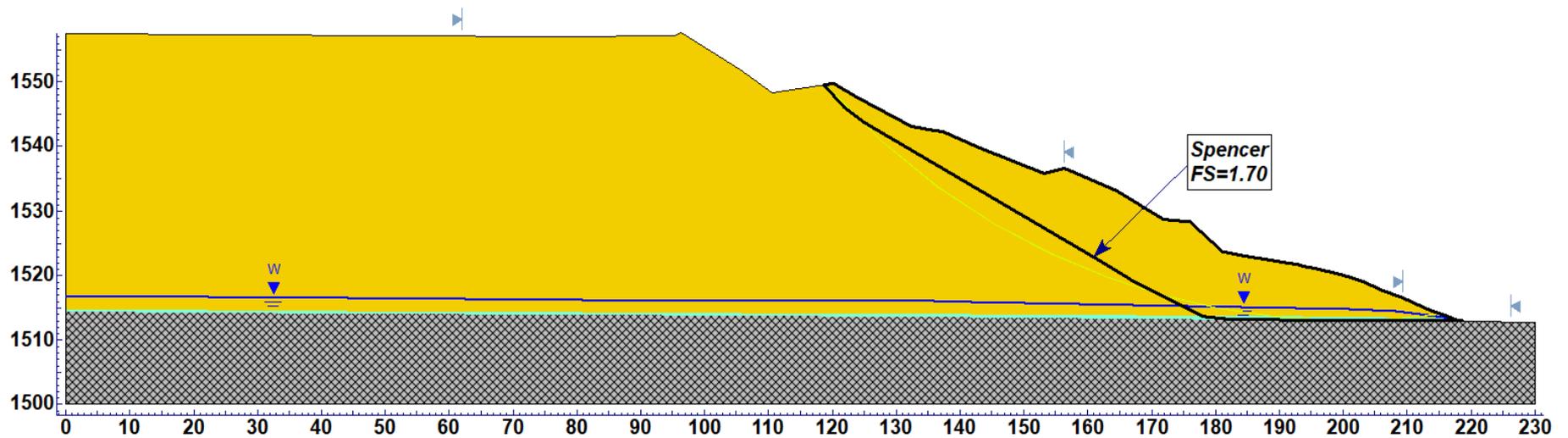


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,70

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

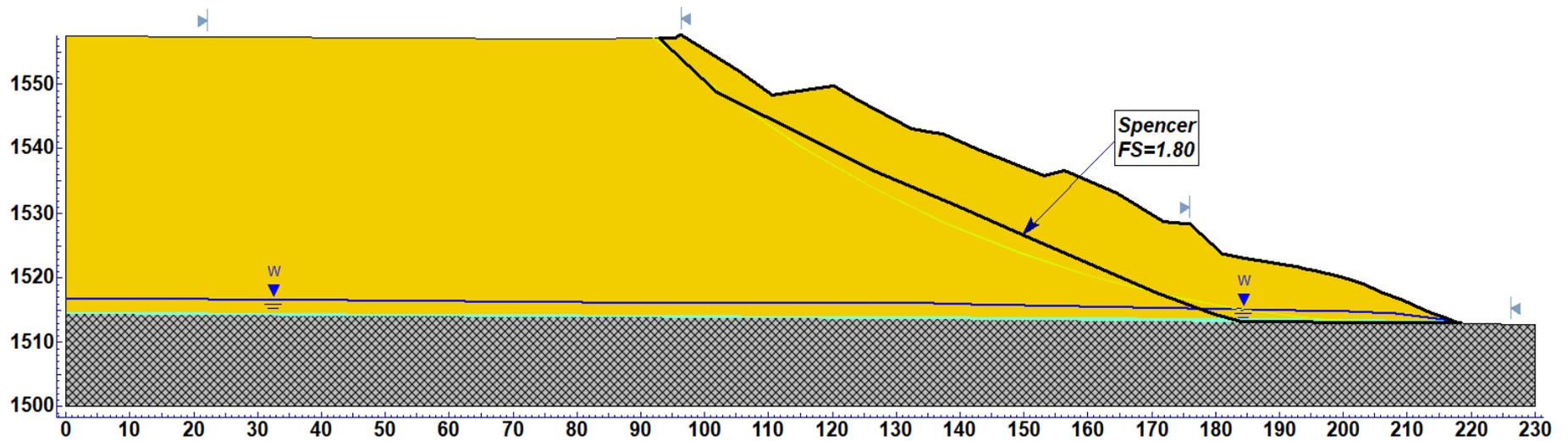


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis estático drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,80

Materiales	γ_{Tot}	c'	ϕ'
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)
Mineral lixiviado drenado	19	0	34
Interfase	18	0	25
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1	

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

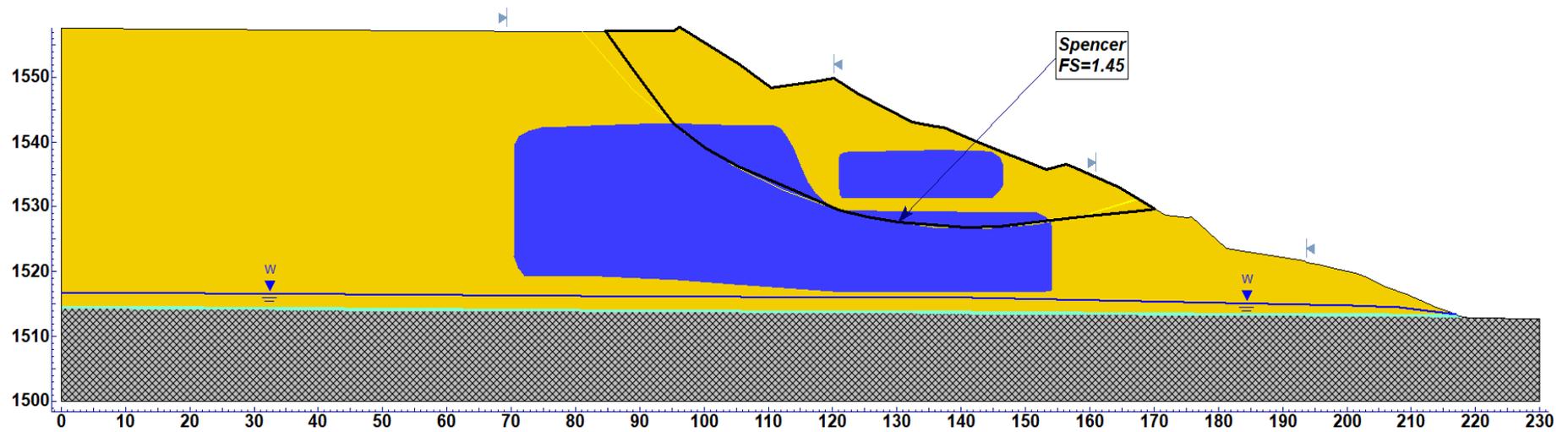


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,45

Materiales	γ_{tot} (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' ($^{\circ}$)	S_u/σ'_{v0}
				-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,31
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

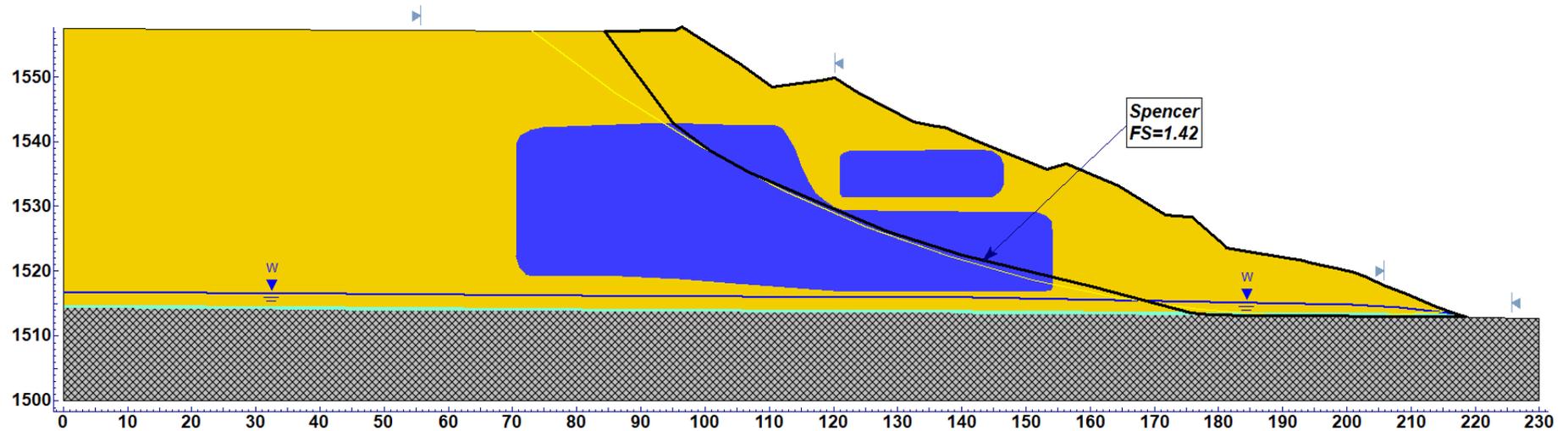


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis estático no drenado - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,42

Materiales	γ_{tot}	c'	ϕ'	S_u/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^\circ$)	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	0,31
Interfase	18	0	25	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 1		

Notas:

1. Material con resistencia infinita.

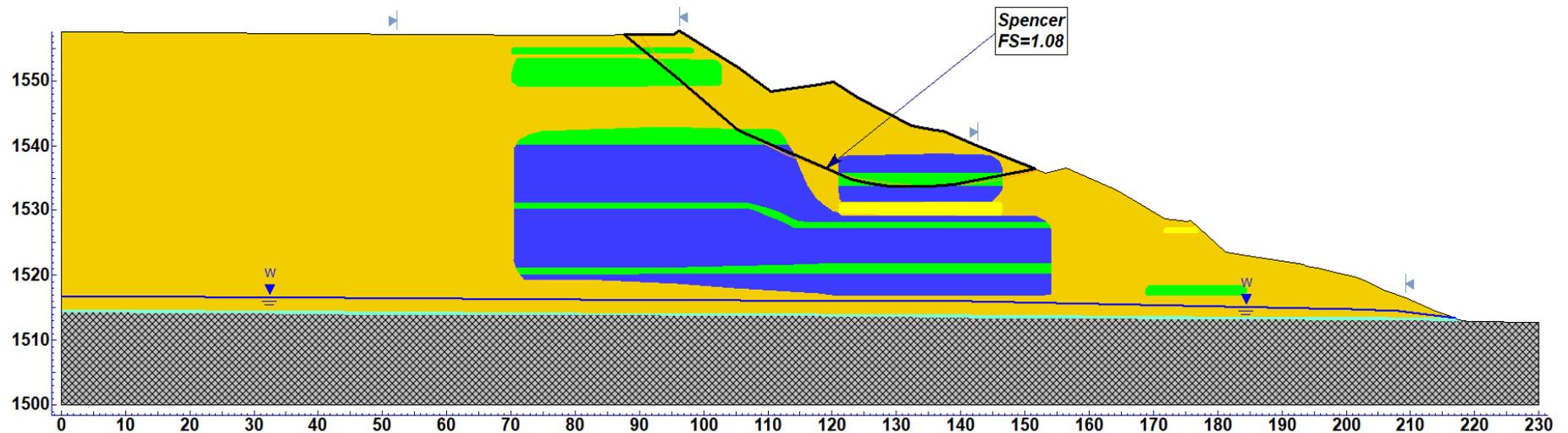


Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo local - F.S. = 1,08

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$Su(yield)/\sigma'_{v0}$	$SuLIQ/\sigma'_{v0}$
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.



Análisis de estabilidad de taludes de la pila de lixiviación
Sección geotécnica 3-3' - Análisis postsismo - Falla no circular de tipo global - F.S. = 1,19

Materiales	γ_{rot}	c'	ϕ'	$S_{u(yield)}/\sigma'_{v0}$	S_{uLIQ}/σ'_{v0}
	(kN/m^3)	(kPa)	($^{\circ}$)	-	-
Mineral lixiviado drenado	19	0	34	-	-
Mineral lixiviado no drenado	19	-	-	Ver nota 1	-
Mineral contractivo	19	-	-	-	0,25
Mineral licuable	19	-	-	-	Ver nota 1
Interfase	18	0	25	-	-
Basamento Rocoso	24	Ver nota 2			

Nota:

1. Los valores de la relación de resistencia no drenada se presentan en la Tabla 5.2.
2. Material con resistencia infinita.

