

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

Evaluación Y Comparación Del Factor De Seguridad Contra La Licuación Para Un Proyecto De La Isla Mocolí Ubicado En El Cantón Samborondón, Utilizando Metodologías Para Ensayos De Penetración Estándar (SPT), Ensayo De Penetración De Cono (CPT) Y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW Para Determinar Ondas De Corte (Vs)

AUTOR:

Murillo Roldós, Fabrizio José

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Caicedo Aspiazu, Adolfo Carlos, MSc.

Guayaquil, Ecuador

9 de marzo del 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Murillo Roldós, Fabrizio José**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**

TUTOR

f. _____
Ing. Caicedo Aspiazu, Adolfo, MSc

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Alcivar Bastidas, Stefany, MSc

Guayaquil, 9 marzo del 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Murillo Roldós, Fabrizio José**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Evaluación Y Comparación Del Factor De Seguridad Contra La Licuación Para Un Proyecto De La Isla Mocolí Ubicado En El Cantón Samborondón, Utilizando Metodologías Para Ensayos De Penetración Estándar (SPT), Ensayo De Penetración De Cono (CPT) Y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW Para Determinar Ondas De Corte (Vs)** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 9 marzo del 2018

EL AUTOR

f. _____
Murillo Roldós, Fabrizio José



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Murillo Roldós, Fabrizio José**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Evaluación Y Comparación Del Factor De Seguridad Contra La Licuación Para Un Proyecto De La Isla Mocolí Ubicado En El Cantón Samborondón, Utilizando Metodologías Para Ensayos De Penetración Estándar (SPT), Ensayo De Penetración De Cono (CPT) Y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW Para Determinar Ondas De Corte (Vs)** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 9 marzo del 2018

EL AUTOR:

f. _____
Murillo Roldós, Fabrizio José



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

REPORTE DE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TRABAJO DE TITULO - FABRIZIO MURILLO.docx (D35938644)
Submitted: 2/26/2018 7:32:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 2 %

Sources included in the report:

796 - parra murrugarra, denys amador.pdf (D33809219)
1427341002_Tesis Ulloa, Vargas.pdf (D13734582)
FCHIRIBOGA-MMORENO-TESIS-GRADO.docx (D34578316)
<https://faculty.engineering.ucdavis.edu/boulanger/publications/>
<http://sandiego.eeri.org/wp-content/uploads/2014/09/Prof.-I.M.-Idriss.pdf>
[http://www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6330/Effect%20of%20fines%20-%20Boulanger%20and%20Idriss\(2006\).pdf](http://www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6330/Effect%20of%20fines%20-%20Boulanger%20and%20Idriss(2006).pdf)
https://faculty.engineering.ucdavis.edu/boulanger/wp-content/uploads/sites/71/2014/09/Boulanger_Idriss_CPT_and_SPT_Liq_triggering_CGM-14-01_20141.pdf

Instances where selected sources appear:

..

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por el apoyo brindado todos estos años.

Al ingeniero Adolfo Caicedo, tutor y exprofesor por la oportunidad laboral y sus enseñanzas.

Al ingeniero Alfredo Torres exprofesor de resistencia de materiales que me motivó a dar lo mejor de mí.

Al ingeniero Roberto Luque por la información y consejos brindados para la realización del proyecto.

A mis compañeros y amigos que me apoyaron siempre y me enseñaron que la esperanza es lo último que se pierde.

Al equipo de béisbol de la Universidad Católica por la oportunidad de estar becado por varios años.

En general a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a cumplir este objetivo en el menor tiempo posible.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres por el apoyo brindado y sus valores inculcados y a mi abuelo el arquitecto “Pepe” Roldós, porque su amor y pasión por su profesión me han motivado a seguir adelante y dar lo mejor de mí a lo largo de la carrera.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Adolfo Caicedo Aspiazú, Msc.
TUTOR

f. _____

Ing. Stefany Alcivar Bastidas, MSc.
DECANO O DIRECTOR DE CARRERA

f. _____

Ing. Roberto Luque Nuques, MSc., PHD.
COORDINADOR DEL ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. ALCANCE	3
1.3. METODOLOGÍA	3
2. ASPECTOS GENERALES	4
2.1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO	4
2.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA	5
2.2.1. Estratigrafía	5
2.2.2. Geología local	6
2.3. AMENAZA SÍSMICA	6
3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	8
3.1. PERFORACIONES SPT	9
3.1.1. Perforación S12	9
3.1.2. Perforación P11	10
3.2. PERFORACIONES CPT	11
3.2.1. Perforación CPT 1	11
3.2.2. Perforación CPT 3	12
3.3. ENSAYOS GEOFÍSICOS (MAM – MASW)	13
3.3.1. Ensayo MASW	13
3.3.2. Ensayo MAM	15
3.3.3. Procesamiento de datos	16
4. LICUACIÓN: REVISIÓN DE LITERATURA	20
4.1. EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO	20
4.2. CSR Y CRR	21
4.3. CRITERIOS DE SUSCEPTIBILIDAD	22
4.3.1. Bray and Sancio (2006)	22
4.3.2. Boulanger & Idriss (2006)	24
4.3.3. Estimación de contenido de finos y clasificación de suelos utilizando datos de CPT (Boulanger & Idriss, 2014)	26
4.4. MÉTODO SIMPLIFICADO (SEED & IDRIS, 1971)	30
4.4.1. Factores fundamentales que influyen el potencial de Licuación	30
4.4.2. Método general para evaluar el potencial de licuación	31
4.4.3. Método Simplificado	33
5. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SITIO	36
5.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	36
5.1.1. Propiedades de los ensayos SPT	36
5.1.2. Propiedades de los ensayos CPT	39
5.1.3. Propiedades del perfil Vs	41
5.2. PERFIL GEOTÉCNICO	42
6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN	43

6.1.	SUSCEPTIBILIDAD-----	43
6.1.1.	Criterios de composición (SPT). -----	43
6.1.2.	Criterio de I_c y correlación I_c vs F_C usando datos de CPT -----	47
6.2.	ANÁLISIS DETERMINISTICO DE LA LICUACIÓN -----	50
6.2.1.	Análisis para SPT - (Boulanger & Idriss, 2014)-----	52
6.2.2.	Análisis para CPT – (Boulanger & Idriss, 2014) -----	61
6.2.3.	Análisis para V_s - (Kayen, y otros, 2013) -----	71
6.3.	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LICUACIÓN -----	80
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	84
8.	REFERENCIAS -----	86
9.	ANEXOS -----	88
	ANEXO 1: PERFORACIONES SPT -----	88
	ANEXO 2: PERFORACIONES CPT -----	100
	ANEXO 3: PERFIL GEOTÉCNICO -----	115

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1:	VALORES DEL FACTOR Z EN FUNCIÓN DE LA ZONA SÍSMICA ADOPTADA (RECUPERADO DE LA NEC-SE-DS)	7
TABLA 2:	RESUMEN DE LA PERFORACIÓN SPT S-12	36
TABLA 3:	RESUMEN DE LA PERFORACIÓN SPT P-11	37
TABLA 4:	FACTORES DE CORRECCIÓN PARA VALORES DE SPT N (IDRISS & BOULANGER, 2008)	38
TABLA 5:	PARÁMETROS FÍSICOS PROMEDIOS DE LA PERFORACIÓN CPT1	40
TABLA 6:	PARÁMETROS FÍSICOS PROMEDIOS DE LA PERFORACIÓN CPT1	40
TABLA 7:	PERFIL V_s DEL SITIO CON SUS PROPIEDADES FÍSICAS	41
TABLA 8:	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ESTRATOS DE LOS PRIMEROS 15 METROS DE LA PERFORACIÓN SPT 12.....	43
TABLA 9:	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ESTRATOS DE LA PERFORACIÓN SPT 11.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1:	UBICACIÓN DEL PROYECTO (TOMADA DE GOOGLE EARTH).....	4
FIGURA 2:	MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO GUAYAS, DONDE APARECE LA ISLA MOCOLÍ EN EL RÍO BABAHOYO. FUENTE: MAPA GEOLÓGICO DEL ECUADOR, ESCALA 1: 1'000.000. SIMBOLOGIA. - Kk= FORMACIÓN CAYO DE EDAD CRETÁCEO SUPERIOR; Kp= FORMACIÓN PIÑÓN CRETÁCICO INFERIOR	5
FIGURA 3:	ECUADOR, ZONAS SÍSMICAS PARA PROPÓSITOS DE DISEÑO Y VALOR DEL FACTOR DE ZONA Z (RECUPERADO DE NEC-SE-DS-2015).....	7
FIGURA 4:	UBICACIÓN DE LAS PERFORACIONES Y ENSAYOS REALIZADOS EN EL PROYECTO.....	8
FIGURA 5:	SISMÓGRAFO GEODE DE LA EMPRESA GEOMETRICS.	14
FIGURA 6:	EQUIPO UTILIZADO PARA REALIZAR LOS ENSAYOS.	14

FIGURA 7: ARREGLO DE LOS GEÓFONOS (COORDENADAS) PARA EL ENSAYO MAM. (CAPTURA EXTRAÍDA DE GEOPSY).....	15
FIGURA 8: CURVA DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL LIMPIA DEL ENSAYO MASW. (CAPTURA EXTRAÍDA DE MATLAB).....	16
FIGURA 9: CURVA DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL LIMPIA DEL ENSAYO MAM.	17
FIGURA 10: CURVA DE DISPERSIÓN EXPERIMENTAL PROMEDIO DE LOS ENSAYOS MASW Y MAM (EXTRAÍDA DEL PROGRAMA DINVER)	18
FIGURA 11: PERFIL DE VELOCIDADES DE ONDAS CORTANTES SUPERFICIALES USANDO MASW – MAM	19
FIGURA 12: EL VALOR DE CSR PARA ALCANZAR LA LICUACIÓN INICIAL ($R_u=100\%$) PARA EL ENSAYO DE MESA VIBRATORIO REALIZADO POR (DEALBA, SEED, & CHAN, 1976)	22
FIGURA 13: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CRITERIO DE SUSCEPTIBILIDAD DE BRAY Y SANCIO (2006): (A) DATOS DEL ENSAYO CTX ISOTRÓPICAMENTE CONSOLIDADO REALIZADO POR BRAY Y SANCIO (2006), (B) DATOS DE CAMPO REALIZADO POR BRAY ET AL. (2004), (C) DATOS DE CAMPO DE POTRERO CANYON REALIZADO POR BENNETT ET AL. (1998), (D) DATOS DE CAMPO REALIZADO POR WANG (1979) Y (E) DATOS DE CAMPO REALIZADOS POR CHUN ET AL. (2004)	24
FIGURA 14: CUADRO DE LÍMITES DE ATTERBERG MOSTRANDO VALORES REPRESENTATIVOS PARA SUELOS QUE EXHIBEN COMPORTAMIENTO COMO ARCILLAS, ARENA O DE TRANSICIÓN. (BOULANGER & IDRIS, 2006).....	25
FIGURA 15: ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA TRANSICIÓN DE COMPORTAMIENTO COMO ARENA A COMPORTAMIENTO COMO ARCILLA CON EL INCREMENTO DE PI, Y UNA LÍNEA GUÍA RECOMENDADA PARA LA PRÁCTICA. (BOULANGER & IDRIS, 2006) .	26
FIGURA 16: CUADRO DE CLASIFICACIÓN DE COMPORTAMIENTO DE SUELO. (ROBERTSON P. K., 1990)	27
FIGURA 17: DATOS Y CORRELACIONES ENTRE IC VS FC (BOULANGER & IDRIS, 2014)	28
FIGURA 18: CORRELACIÓN RECOMENDADA ENTRE IC VS FC CON UNA DESVIACIÓN ESTÁNDAR POSITIVA Y NEGATIVA USANDO LOS DATOS DE SUZUKI ET AL. (1998) Y LOS DATOS DE BOULANGER E IDRIS. (BOULANGER & IDRIS, 2014)	29
FIGURA 19: MÉTODO GENERAL PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE LICUACIÓN. (SEDD & IDRIS, 1967) EXTRAÍDO DE (SEED & IDRIS, 1971)	32
FIGURA 20: ESQUEMA PARA DETERMINAR EL MÁXIMO ESFUERZO DE CORTE Y EL COEFICIENTE DE REDUCCIÓN, R_d . (IDRIS & BOULANGER, 2008)	34
FIGURA 21: VARIACIONES DEL COEFICIENTE DE REDUCCIÓN DE ESTRÉS R_d CON LA PROFUNDIDAD Y LA MAGNITUD DE MOMENTO (IDRIS I. M., 1999)	34
FIGURA 22: PERFIL GEOTÉCNICO DEL PROYECTO	42
FIGURA 23: ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ESTRATOS DE LA PERFORACIÓN SPT 12 UTILIZANDO (BRAY & SANCIO, 2006).....	44
FIGURA 24: ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ESTRATOS DE LA PERFORACIÓN SPT 11 UTILIZANDO (BRAY & SANCIO, 2006).....	45
FIGURA 25: ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ESTRATOS DE LA PERFORACIÓN SPT 12 UTILIZANDO (BOULANGER & IDRIS, 2006).....	46
FIGURA 26: ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS ESTRATOS DE LA PERFORACIÓN SPT 12 UTILIZANDO (BOULANGER & IDRIS, 2006).....	46
FIGURA 27: DATOS IC VS FC DEL PROYECTO, CORRELACIONES DE BOULANGER E IDRIS (2014) Y CURVA CARACTERÍSTICA DEL SITIO.	48
FIGURA 28: CORRELACIÓN DE IC VS FC PARA EL SITIO DEL PROYECTO CON $CFC=-$ 0.395, LOS DATOS DEL PROYECTO Y LOS RECOPIADOS POR (BOULANGER & IDRIS, 2014) Y SUZUKI ET. AL. (1998) UTILIZANDO EL SOFTWARE GRAPHER.....	49

FIGURA 29: VARIACIÓN DEL VALOR DE N CORREGIDO VS EL CONTENIDO DE FINOS (IDRISS & BOULANGER, 2008).....	53
FIGURA 30: DATOS DEL PERFIL SPT S-12 INGRESADOS EN EL PROGRAMA LIQSVs DE LA EMPRESA GEOLOGISMIKI.	54
FIGURA 31: DATOS DEL PERFIL SPT P-11 INGRESADOS EN EL PROGRAMA LIQSVs DE LA EMPRESA GEOLOGISMIKI.	54
FIGURA 32: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL SPT S-12 CON MW=7, AMAX=0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA LIQSVs DE GEOLOGISMIKI. (BOULANGER & IDRISS, 2014).....	56
FIGURA 33: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL SPT P-11 CON MW=7, AMAX=0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA LIQSVs DE GEOLOGISMIKI. (BOULANGER & IDRISS, 2014).....	57
FIGURA 34: COMPARACIÓN DEL FS VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT S-12 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7.5 – 9.5M). METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	58
FIGURA 35: COMPARACIÓN DEL FS VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT P-11 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7.5 – 9.5M). METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	58
FIGURA 36: COMPARACIÓN DEL LPI VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT S-12 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	59
FIGURA 37: COMPARACIÓN DEL LPI VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT P-11 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	59
FIGURA 38: COMPARACIÓN DEL V. SET. LIQ. VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT S-12 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	60
FIGURA 39: COMPARACIÓN DEL V. SET. LIQ. VS A PARA LA PERFORACIÓN SPT P-11 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	60
FIGURA 40: AJUSTE DE ARENA LIMPIA EQUIVALENTE PARA EL PROCEDIMIENTO DE DEENCADENAMIENTO DE LICUACIÓN CON DATOS CPT (BOULANGER & IDRISS, 2014)	62
FIGURA 41: CAPTURA DE LOS DATOS (CPT – 1) INGRESADOS Y LOS RESULTADOS ESTIMADOS EN EL PROGRAMA CLIQ2 BOULANGER E IDRISS (2014)	64
FIGURA 42: CAPTURA DE LOS DATOS (CPT – 3) INGRESADOS Y LOS RESULTADOS ESTIMADOS EN EL PROGRAMA CLIQ2 BOULANGER E IDRISS (2014)	65
FIGURA 43: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL CPT-1 CON MW=7, AMAX=0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA CLIQ2 DE GEOLOGISMIKI. (BOULANGER & IDRISS, 2014)	66
FIGURA 44: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL CPT-3 CON MW=7, AMAX=0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA CLIQ2 DE GEOLOGISMIKI. (BOULANGER & IDRISS, 2014)	67
FIGURA 45: COMPARACIÓN DEL FS VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-1 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7.5 – 9.5M). METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	68
FIGURA 46: COMPARACIÓN DEL FS VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-3 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7.5 – 9.5M). METODOLOGÍA BOULANGER E IDRISS (2014)	68

FIGURA 47: COMPARACIÓN DEL LPI VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-1 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRIS (2014)	69
FIGURA 48: COMPARACIÓN DEL LPI VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-3 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRIS (2014)	69
FIGURA 49: COMPARACIÓN DEL V. SET. LIQ. VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-1 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRIS (2014)	70
FIGURA 50: COMPARACIÓN DEL V. SET. LIQ. VS A_{MAX} PARA LA PERFORACIÓN CPT-3 USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M. METODOLOGÍA BOULANGER E IDRIS (2014)	70
FIGURA 51: CAPTURA DE LOS DATOS INGRESADOS AL PROGRAMA LIQSVs DEL PERFIL Vs (UTILIZANDO LOS ESTRATOS SUSCEPTIBLES A LICUACIÓN DE S-12) REALIZADO EN EL PROYECTO.....	73
FIGURA 52: CAPTURA DE LOS DATOS INGRESADOS AL PROGRAMA LIQSVs DEL PERFIL Vs (UTILIZANDO LOS ESTRATOS SUSCEPTIBLES A LICUACIÓN DE P-11) REALIZADO EN EL PROYECTO.....	74
FIGURA 53: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL Vs(S-12) CON MW=7, A_{MAX} =0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA LIQSVs DE GEOLOGISMIKI. (KAYEN, Y OTROS, 2013)	76
FIGURA 54: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACIÓN PARA EL PERFIL Vs(P-11) CON MW=7, A_{MAX} =0.4G Y N.F.=2M, UTILIZANDO EL PROGRAMA LIQSVs DE GEOLOGISMIKI. (KAYEN, Y OTROS, 2013)	77
FIGURA 55: COMPARACIÓN DEL FS VS A_{MAX} PARA EL PERFIL Vs(S-12) REALIZADO EN EL PROYECTO USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7 – 9.5M). (KAYEN, Y OTROS, 2013)	78
FIGURA 56: COMPARACIÓN DEL FS VS A_{MAX} PARA EL PERFIL Vs(P-11) REALIZADO EN EL PROYECTO USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (PROFUNDIDAD DE 7 – 9.5M). (KAYEN, Y OTROS, 2013)	78
FIGURA 57: COMPARACIÓN DEL LPI VS A_{MAX} PARA EL PERFIL Vs(S-12) REALIZADO EN EL PROYECTO USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (KAYEN, Y OTROS, 2013)	79
FIGURA 58: COMPARACIÓN DEL LPI VS A_{MAX} PARA EL PERFIL Vs(P-11) REALIZADO EN EL PROYECTO USANDO DISTINTOS VALORES DE MW. Y NIVEL FREÁTICO=2M (KAYEN, Y OTROS, 2013)	79
FIGURA 59: COMPARACIÓN DE FS VS A_{MAX} (PARA LAS PROFUNDIDADES DE 7 – 9.5M) UTILIZANDO DISTINTOS ENSAYOS Y METODOLOGÍAS UTILIZANDO MW. 7 Y NIVEL FREÁTICO DE 2M.....	81
FIGURA 60: COMPARACIÓN DE LPI VS A_{MAX} UTILIZANDO DISTINTOS ENSAYOS Y METODOLOGÍAS UTILIZANDO MW. 7 Y NIVEL FREÁTICO DE 2M.	82
FIGURA 61: COMPARACIÓN DE VET. SET. LIQ. VS A_{MAX} UTILIZANDO DISTINTOS ENSAYOS Y METODOLOGÍAS UTILIZANDO MW. 7 Y NIVEL FREÁTICO DE 2M.	83

RESUMEN

Ecuador al ser un país con riesgo sísmico alto está expuesto a terremotos de gran magnitud. Uno de los problemas geotécnicos más grandes causados por los sismos es el de la licuación de las arenas saturadas, debido a que causan daños severos en las estructuras, edificios, vías, etc. por estas razones es importante conocer si un suelo es susceptible a licuación y si ocurrirá para un sismo esperado. Actualmente existen varias metodologías para evaluar el potencial de licuación de los estratos arenosos que están basadas en el método simplificado (Seed & Idriss, 1971). Este trabajo presentará los análisis de potencial de licuación para las metodologías SPT, CPT y Vs para un proyecto ubicado en la Isla Mocolí en el cantón Samborondón. Para evaluar la susceptibilidad de un estrato a licuarse para los ensayos SPT y VS se utilizaron las metodologías de Bray y Sancio (2006) y Boulanger e Idriss (2006), para los ensayos CPT se utilizó Boulanger e Idriss (2014) y se realizó correlaciones de I_c vs FC para encontrar el valor de C_{FC} característico del sitio. Para este proyecto se realizó la evaluación potencial de licuación para los estratos granulares por 3 distintas metodologías: SPT (Boulanger & Idriss, 2014), CPT (Boulanger & Idriss, 2014) y Vs (Kayen et. Al., 2013) y se compararon y graficaron los valores de Factor de seguridad (FS), índice de potencial de licuación (LPI) y asentamientos verticales causados por licuación.

Palabras Claves: VS; SPT; CPT; LICUACIÓN; FS; LPI; ASENTAMIENTOS VERTICALES.

ABSTRACT

High magnitude earthquakes are frequent in Ecuador's storyline; therefore, liquefaction is a mayor hazard while analyzing saturated sands. It can cause structural damage to buildings, highways, bridges, etc. if an excepted earthquake hits susceptible sands that were not spotted in time. Nowadays, liquefaction in sandy layers is measured by many processes that are based on the simplified method. (Seed & Idriss, 1971). This work will present the analyses of liquefaction potential for SPT, CPT and Vs methods for a project in Mocoli Island, Samborondon. In order to measure the liquefaction susceptibility of a specific layer for SPT and VS tests, (Bray & Sancio, 2006) and (Boulanger & Idriss, 2006) methodologies were applied. On CPT (Boulanger & Idriss, 2014) methodology was used as well, combined with correlations on IC vs FC in order to find the definitive C_{FC} value for the site. The methodologies used for liquefaction potential evaluation were: Boulanger & Idriss (2014) for SPT and CPT and Kayen et. al. (2013) for Vs. Afterwards tests were visually compared on a graphic with FS, LPI and vertical settlements all caused by liquefaction.

Key Words: VS; SPT; CPT; LIQUEFACTION; FS; LPI; VERTICAL SETTLEMENTS.

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería geotécnica de terremotos ha estudiado extensamente el fenómeno de la licuación de las arenas a lo largo de los años, por lo que varios autores han propuesto distintas metodologías para determinar la susceptibilidad de un suelo a este fenómeno y determinar si efectivamente ocurrirá bajo la acción del sismo esperado. Las diferentes metodologías dependen principalmente del tipo de sondeo de suelo que se haya realizado en el sitio, las más estudiadas son el ensayo de penetración estándar (SPT) y ensayo de penetración de cono (CPT) pero en las últimas décadas se ha incrementado el estudio y el uso las Velocidades de Ondas de Corte Superficiales para determinar los estratos del subsuelo, así como para la evaluación de licuación de un suelo.

En este proyecto se cuenta con los 3 tipos de sondeos mencionados anteriormente por lo cual se realizará la evaluación de la susceptibilidad a la licuación para las metodologías más conocidas para cada sondeo.

Se ha decidido realizar este proyecto porque la licuación es una amenaza real para el Ecuador debido a la amenaza sísmica a la que está expuesta el país. Ecuador ha sufrido eventos sísmicos de magnitud considerable en los últimos años y se han encontrado zonas afectadas por el fenómeno de la licuación por lo cual es importante conocer con antelación si un suelo puede ser susceptible a licuación o no antes de la realización de un proyecto de ingeniería.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Evaluar y comparar el factor de seguridad a licuación, el índice del potencial de licuación y el asentamiento vertical utilizando Ensayos de Penetración Estándar (SPT), Ensayos de Penetración de Cono (CPT) y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW para determinar Ondas de Corte (V_s) para un terreno ubicado en la vía a Samborondón.

1.1.2. Objetivos específicos

- Idealizar el perfil geotécnico de suelo del sitio y establecer los estratos que puedan ser potencialmente licuables utilizando los ensayos SPT, CPT y V_s
-
- Determinar los estratos susceptibles a licuación.

- Evaluar el factor de seguridad contra la licuación, el índice del potencial de licuación y los asentamientos esperados utilizando el ensayo SPT.
- Evaluar el factor de seguridad contra la licuación, el índice del potencial de licuación y los asentamientos esperados utilizando el ensayo CPT.
- Evaluar el factor de seguridad contra la licuación, el índice del potencial de licuación y los asentamientos esperados utilizando las velocidades de Ondas de Corte superficiales.
- Comparar los resultados obtenidos para los 3 tipos de ensayos.

1.2. ALCANCE

Este trabajo tiene por finalidad determinar los estratos susceptibles a licuación, los factores de seguridad a licuación, los índices del potencial de licuación y los asentamientos para los métodos mencionados anteriormente utilizando correlaciones existentes por distintos autores y también se comparará y se emitirán opiniones en base al criterio del autor.

El trabajo en ningún momento asegurará que se producirá o no la licuación en el sitio a analizar y tampoco se realizarán pruebas experimentales para determinarlos. Este trabajo solo se limitará a utilizar las correlaciones existentes.

1.3. METODOLOGÍA

Este trabajo se lo realizará en base a los conocimientos básicos de la mecánica de suelos y la ingeniería geotécnica de terremotos. Se seguirán los métodos de varios autores como Seed, Idriss, Boulanger, Bray, Sancio, Kayen, Robertson, etc.

Los análisis del potencial de licuación se los realizarán con la ayuda de los programas elaborados por la compañía Geologismiki. Para las metodologías basadas en ensayos (SPT) y (Vs) el programa se llama LiqSVs y para la metodología basada en (CPT) el programa a utilizar será el Cliq2.

2. ASPECTOS GENERALES

2.1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

La isla Mocolí se encuentra localizada en el cantón Samborondón cercana a la orilla derecha del río Babahoyo a unos 10 km al Norte de la Puntilla, sitio de confluencia entre dicho río y el Daule.

Esta isla fue elegida para desarrollar varias urbanizaciones, por lo que los promotores se vieron en la necesidad de trazar un puente que la uniera con la parte terrestre entre los ríos Daule y Babahoyo, por donde pasa actualmente la Vía Perimetral que constituye el único eje vial de este sector urbanizado del cantón Samborondón, conocido también con el término impreciso de "entreríos".

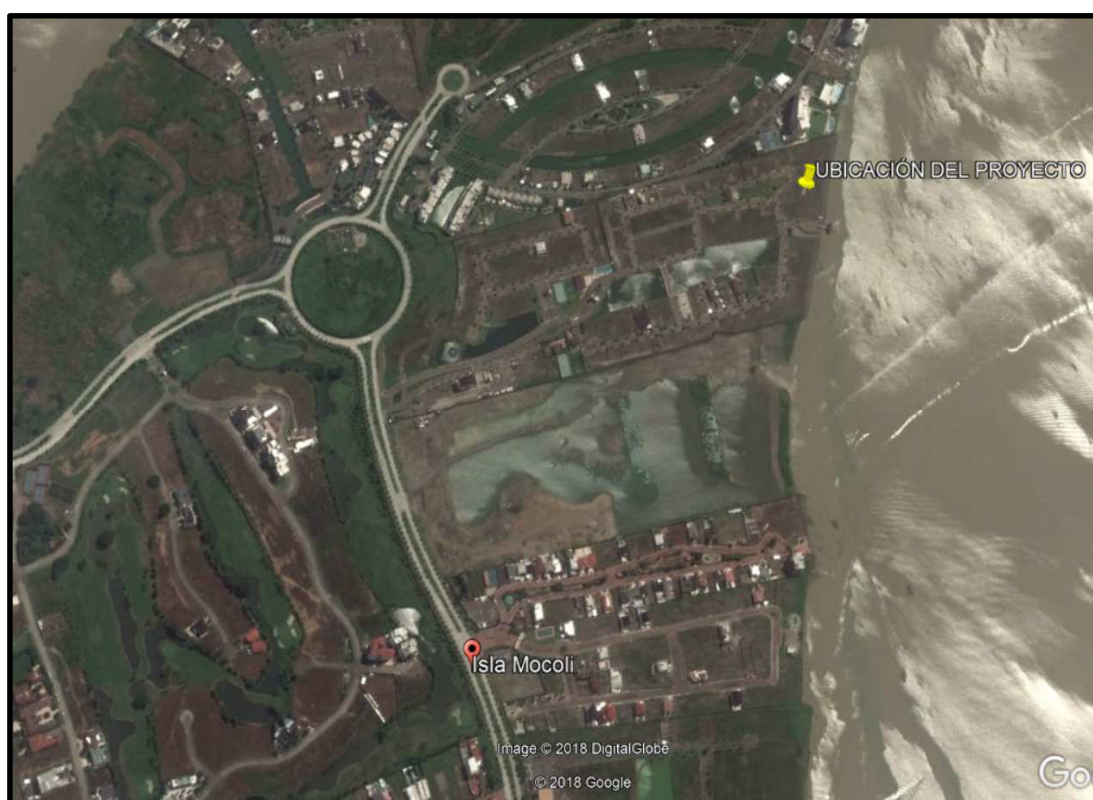


FIGURA 1: Ubicación del Proyecto (Tomada de Google Earth)

En el terreno del proyecto se han realizado varios tipos de sondeos para determinar el perfil de suelo existente, varios ensayos de penetración estándar (SPT), ensayo de penetración de cono (CPT) y ensayos MASW y MAM para determinar el perfil de ondas de corte superficiales (V_s). Se escogieron dos SPT y dos CPT para la evaluación de licuación del terreno, el perfil de V_s fue obtenido mediante la inversión de los datos obtenidos por los ensayos MASW y MAM conjuntamente.

2.2. GEOLOGÍA DE LA ZONA

2.2.1. Estratigrafía

La formación Cayo de edad Cretáceo Superior, que subyace a la formación aluvial actual está conformada por lutitas y areniscas volcano-clásticas que son bien consolidadas, aunque no son rocas de muy buena calidad geotécnica.

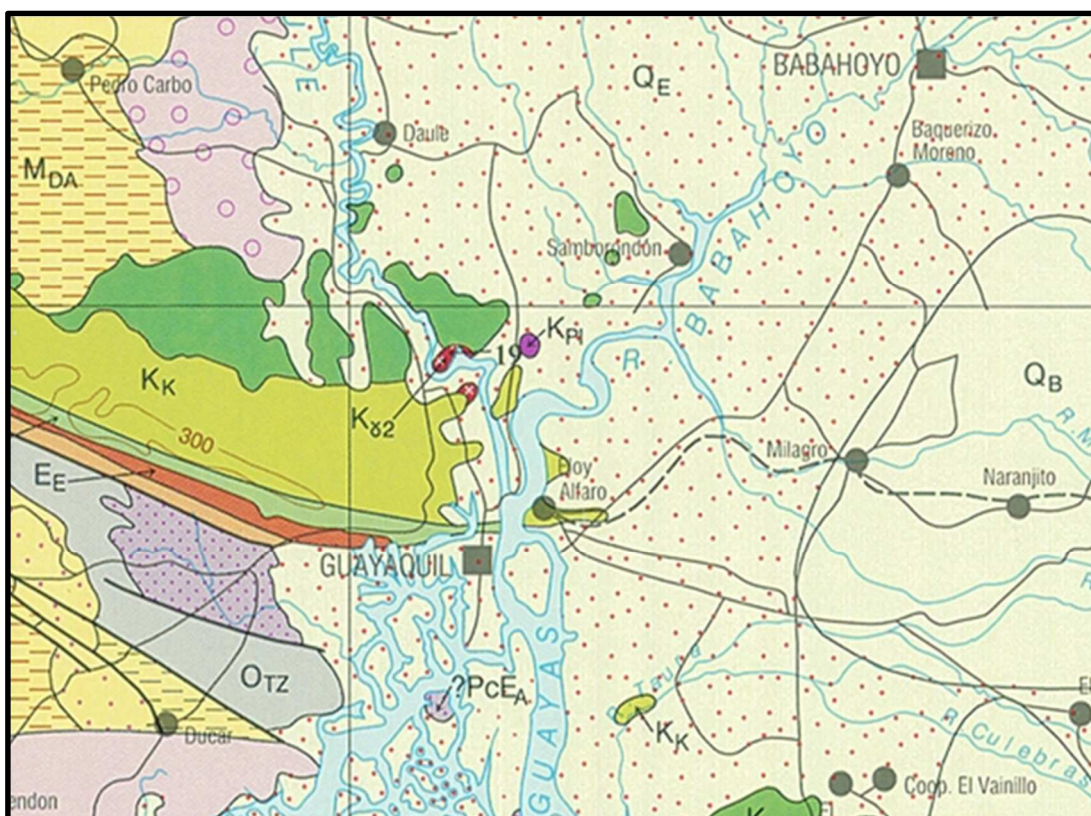


FIGURA 2: Mapa geológico de la cuenca baja del río Guayas, donde aparece la isla Mocolí en el río Babahoyo. Fuente: Mapa Geológico del Ecuador, escala 1: 1'000.000. SIMBOLOGIA. - Kk= formación Cayo de edad Cretáceo Superior; Kp= formación Piñón cretáceo inferior

El Cuaternario aluvial bien representado en los primeros 40 m de profundidad, en los cuales existe una muy buena información de las perforaciones efectuadas en el sitio, consiste en una sucesión de arenas y limos con diferente grado de compactación.

2.2.2. Geología local

La geología local se la puede obtener de las perforaciones y ensayos efectuados en el lugar del proyecto. Se realizaron varias perforaciones SPT y CPT algunas de ellas sobrepasando los 40 metros de profundidad sin encontrar un basamento rocoso, pero encontrando el estrato resistente pasando los 30 metros que consiste en una SM denso con altos números de golpes.

2.3. AMENAZA SÍSMICA

La costa ecuatoriana está localizada en el sector de colisión de las placas tectónicas Nazca (hacia el Oeste, en el océano) y Sudamericana (territorio ecuatoriano). Algunas de estas zonas tienen actividad sísmica más frecuente que otras, estas últimas se denominan brechas sísmicas, donde las deformaciones están continuamente incrementándose, acumulando energía hasta que la roca llegue a su límite de resistencia y colapse liberando la energía en un gran sismo.

Esta convergencia de placas es también conocida como zona de subducción, donde los registros sísmicos ecuatorianos reportan fuertes terremotos de $M_w > 7.75$; el sismo de mayor magnitud M_w 8.7 fue generado el 31 de enero de 1906, a una profundidad de 25 Km, costa afuera 138 Km W del sitio Tortuga, Esmeraldas, causando entre 500 a 1500 víctimas mortales. Este es el séptimo terremoto más fuerte en el mundo registrado desde los 1900. Gustcher et al. (1999), atribuye el origen del terremoto de 1906 a un desplazamiento de ruptura cortical de cerca 500 Km de longitud, que se extiende costa afuera desde los límites de Manabí (Ecuador) hasta Tumaco (Colombia); sísmicamente reactivada en 1942 (M 7.9), 1958 (M 7.8) y 1979 (M 8.1). El terremoto de 1998 en Bahía de Caráquez (M 7.1), también puede ser posiblemente la consecuencia de la reactivación de la ruptura anteriormente mencionada. Al sur, otro segmento de rotura, también ha generado considerables terremotos que han afectado al Golfo de Guayaquil, reportados en 1901 (M 7.6), 1933 (M 6.9) y 1953 (7.8) (Silgado, 1957).

El evento sísmico ocurrido el 16 de abril de 2016, de 7,8 grados en la escala de Richter cuyo epicentro fue el cantón de Pedernales en la provincia de Manabí, se añade a esta lista de eventos sísmicos a lo largo de la costa ecuatoriana causando muchos destrozos en muchos casos en estructuras esenciales.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo de peligro sísmico presenta un mapa de valores aceleraciones esperadas en roca (Factor Z) para las distintas regiones y zonas del país.

Según la Norma Ecuatoriana De la Construcción (NEC, 2015) el mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

TABLA 1: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada (Recuperado de La NEC-SE-DS)

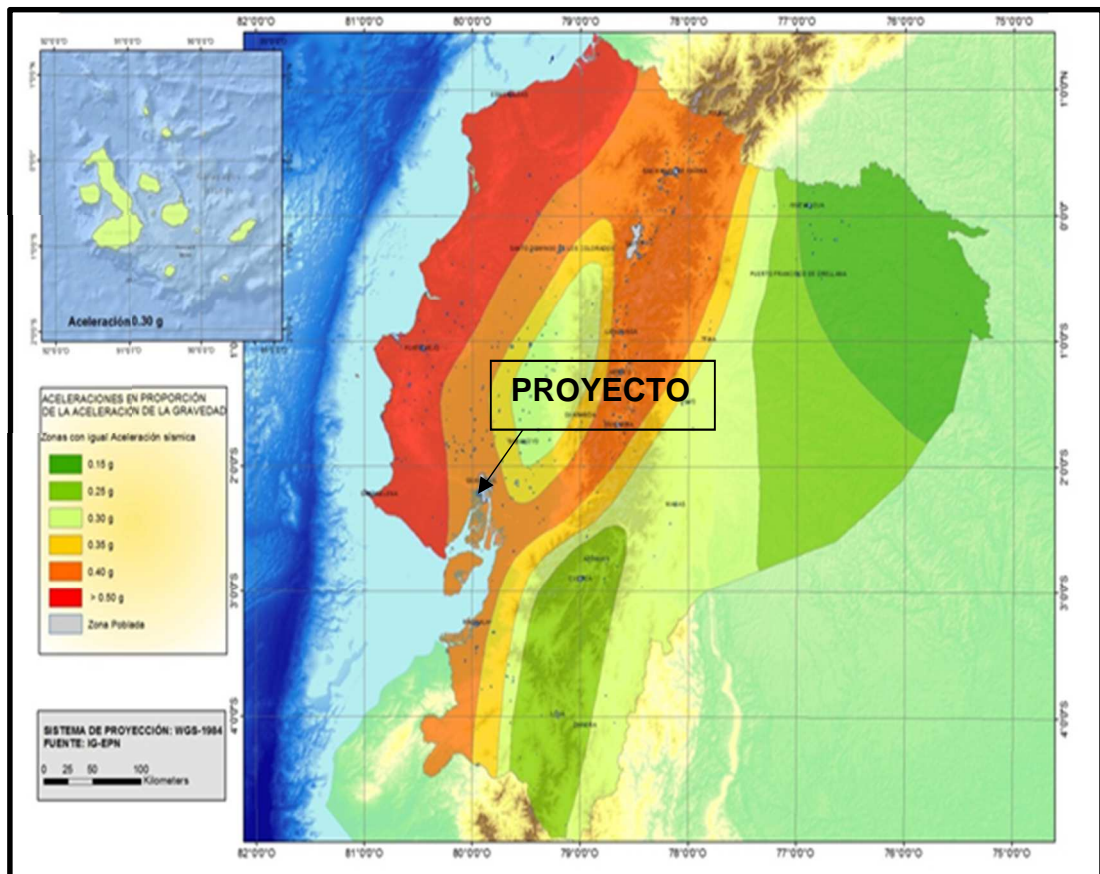


FIGURA 3: Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (Recuperado de NEC-SE-DS-2015)

Como se puede apreciar en el mapa de zonificación, el valor de Z recomendado por la NEC-15 para la zona del proyecto es de 0.4g lo cual representa una amenaza alta.

3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

En el proyecto se realizaron varias perforaciones SPT, CPT y ensayos Geofísicos MASW-MAM. A continuación, se muestra la ubicación de los ensayos descritos.

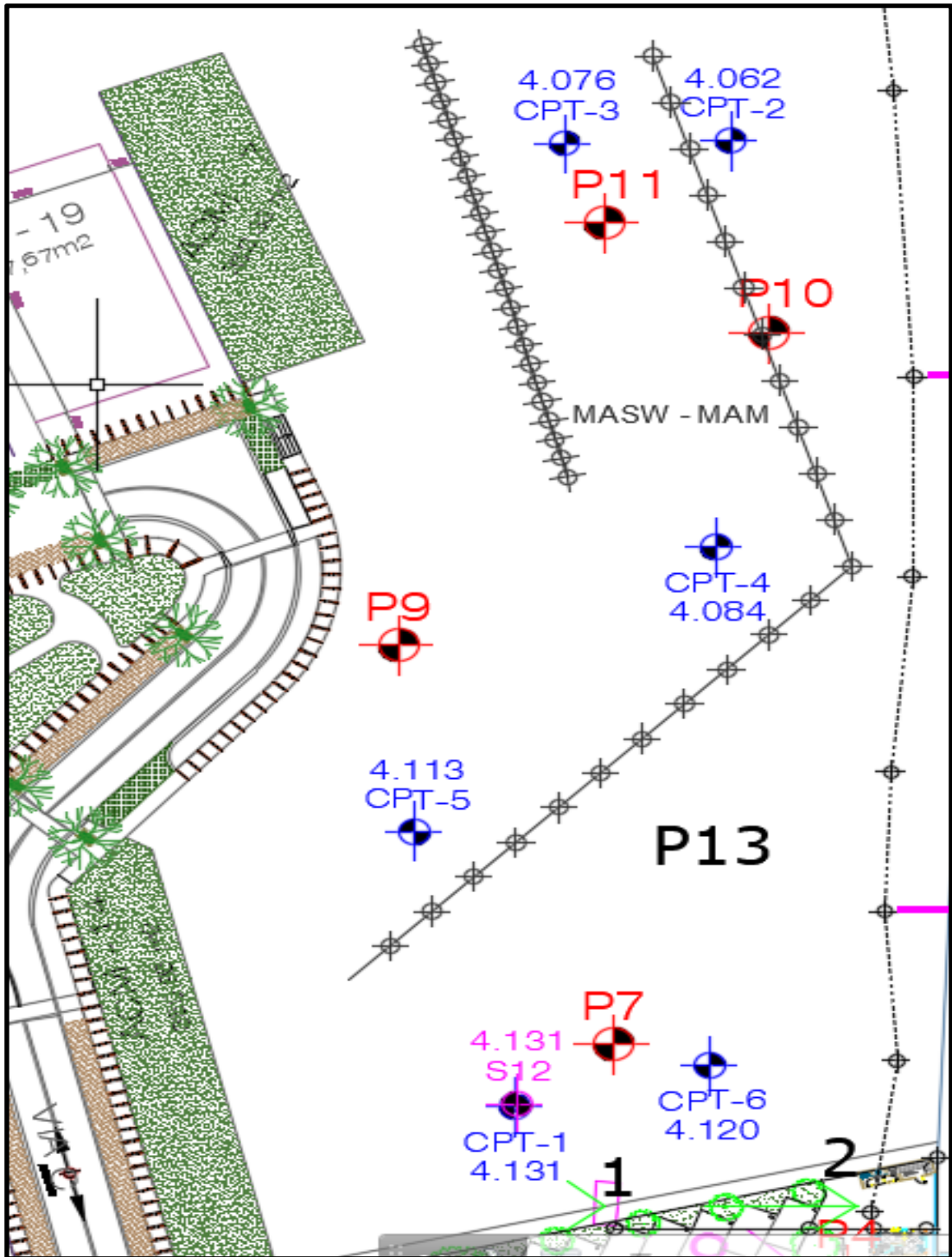


FIGURA 4: UBICACIÓN DE LAS PERFORACIONES Y ENSAYOS REALIZADOS EN EL PROYECTO

3.1. PERFORACIONES SPT

Las perforaciones utilizadas en este proyecto son la S12 y la P11, fueron realizadas por la compañía NYLIC. Se describirán los estratos encontrados en cada perforación, los resúmenes de las perforaciones se presentarán en los anexos.

3.1.1. Perforación S12

La cota del terreno natural al momento de la perforación fue de 4.13 m.s.n.m, se encontró nivel freático a los 3.25 metros de profundidad y la profundidad máxima que alcanzó la perforación fue de 45 metros aproximadamente. Esta perforación se la hizo en el mismo lugar del CPT1 por lo que a ciertas profundidades no se recuperó muestra y se continuó lavando el suelo.

- Se comienza la perforación utilizando lavado hasta los 5.55 metros de profundidad.
- El primer estrato avanza hasta los 5.7 metros y encontramos una arena fina arcillosa color gris verdosa de compacidad suelta con una humedad del 42%, un límite Líquido de 53%, un índice plástico de 32% y con un golpe en 30 cm.
- El segundo estrato avanza hasta los 6.5 metros de profundidad y la comprende una arcilla limosa color gris verdosa de consistencia blanda y con dos golpes en 30 cm.
- El tercer estrato avanza hasta los 9.5 metros de profundidad y es en su mayoría arena limosa de compacidad suelta a medio densa de plasticidad nula a excepción de los primeros metros que es una arena arcillosa con 22% de índice plástico. Los golpes varían entre 2 a 19 siendo el promedio alrededor de 10 golpes en 30 cm.
- El cuarto estrato avanza hasta los 10.75 metros de profundidad y comprende un limo arcilloso con lentes de arena de baja plasticidad color gris verdoso de consistencia blanda con un límite líquido de 50% y un índice plástico de 19% y dos golpes en 30 cm.
- El quinto estrato avanza hasta los 11.9 metros y comprende una arena limosa color gris verdosa de compacidad medio densa con plasticidad nula y 8 golpes en 30 cm.
- El sexto estrato avanza hasta los 14.5 metros y comprende un limo arenoso de baja plasticidad color gris de consistencia firme con un índice plástico menor a 18%, límite líquido menor a 50% y 14 golpes en 30 cm.
- El séptimo estrato es una arena fina - arcillosa gris verdosa de compacidad suelta. La primera parte tiene plasticidad nula y la última capa con un índice de plasticidad de 23% y de 3 – 6 golpes en 30 cm.
- Luego se continúa el sondeo mediante lavado hasta los 33.35 metros de profundidad.
- Los siguientes estratos avanzan hasta los 45 metros de profundidad y comprenden arenas limosas y limos de baja plasticidad con más de 50 golpes en 30 cm.

3.1.2. Perforación P11

La cota del terreno en el momento de la perforación era de 2.76m, se encontró el nivel freático a 2.20 metros de profundidad y la perforación alcanzó los 39 metros de profundidad.

- Los primeros 1.5 metros de un relleno de grava arenosa.
- Después se encuentra un limo arcilloso color verdoso con materia orgánica de alta plasticidad hasta los 2.5 metros de profundidad.
- El tercer estrato que se encuentra es una arcilla arenosa de Alta plasticidad color gris verdosa hasta los 5.85 metros de profundidad.
- Luego encontramos una arena limosa color gris verdosa de compacidad de suelta a media suelta de plasticidad nula a excepción del primer metro que es una arena arcillosa con índice de plasticidad de 26. Los números de golpes varían de 3 a 17 siendo el promedio de 8. Este estrato se extiende hasta los 9 metros de profundidad.
- El siguiente estrato se extiende hasta los 11.5 metros de profundidad y comprende un limo arcilloso de alta plasticidad color gris verdoso con lentes de arena fina con 2 golpe en 30 centímetros.
- Luego encontramos una arcilla limo arenosa color gris verdosa de compacidad suelta hasta los 13.1 metros de profundidad. con 8 golpes en 30 cm.
- Seguido existe una arena limo arcillosa color gris verdosa de compacidad suelta hasta los 15 metros de profundidad, de plasticidad nula y 8 golpes en 30 cm.
- A continuación, existe un limo arcilloso color café oscuro con pintas de materia orgánica que se extiende hasta los 20.5 metros con 8.25 t/m² de qu.
- El siguiente estrato avanza hasta los 22 metros de profundidad encontramos una arcilla limosa color verdosa de consistencia firme y 12 golpes en 30 cm.
- Después encontramos un limo arcilloso de alta plasticidad de consistencia muy firme a dura con número de golpes de 16 – 38 y se extiende hasta los 30 metros de profundidad.
- Finalmente, hasta los 40 metros de profundidad encontramos una arena limosa de plasticidad nula de más de 50 golpes en 30 cm.

3.2. PERFORACIONES CPT

Los ensayos utilizados en este proyecto serán los CPT 1 y CPT 3. La compañía encargada de realizar estos sondeos fue TECNAC. Los resultados de los ensayos se muestran en los anexos.

3.2.1. Perforación CPT 1

Este sondeo se encuentra ubicado en el mismo lugar que la Perforación S12 como se muestra en la figura 4. La cota del terreno natural al momento del sondeo fue de 4.5 m.s.n.m y se encontró el nivel freático a los 2.5 metros de profundidad.

- Se excavó una calicata de 3 metros y de ahí comenzó el ensayo.
- Los primeros 8 metros podemos observar que el suelo en su mayoría es una arcilla con un qc menor a 1 MPA.
- A partir de los 8 metros se puede apreciar que el SBT varía entre arenas con limos y limos con arenas (5 – 6) y con un qc promedio de 5 MPA y con pico de 7.5 MPA aproximadamente.
- A partir, de los 9.5 hasta los 12.25 metros de profundidad aproximadamente encontramos un estrato de arcilla en su mayoría con qc menores a 2 MPA a excepción de un salto.
- A continuación, encontramos un estrato que en su mayoría es arena limosa con arena. Con qc promedio de 3.6 MPA, pero con picos en el orden 7.5 MPA aproximadamente. El estrato se extiende hasta los 15 metros aproximadamente.
- Luego podemos encontrar un estrato bastante ancho que avanza hasta los 24 metros de profundidad aproximadamente de arcilla en su gran mayoría con valores de qc menores a 5 MPA y 2.3 MPA de promedio.
- A partir de los 24 metros se encuentra una arena de qc promedio de 20 MPA y picos mayores a 30 MPA, luego a los 26 metros encontramos un estrato de arcilla hasta los 28 metros de qc menor a 5 MPA en promedio y nuevamente encontramos un estrato pequeño de arena con un qc promedio en el orden 12.5 MPA pero con picos de hasta 20 MPA.
- A los 29 metros volvemos a encontrar una arcilla hasta los 33 metros de profundidad con valores de qc menores a 5 MPA.
- Finalmente, a partir de los 33 metros de profundidad encontramos una transición entre arcillas y limos arenosos con qc mayores a 10 MPA en su mayoría.

3.2.2. Perforación CPT 3

La perforación CPT 3 es la más cercana a la perforación P11 (SPT) se la escogió debido a esta razón. Se realizó una calicata de 3 metros y se encontró el nivel freático también a los 3 metros de profundidad.

- Luego de la calicata encontramos una arcilla que avanza hasta los 7.5 metros de profundidad con 2 lentes de arena limosa o limo arenoso entre los 4.5 y 5.5 metros. El qc de la arcilla se encuentra por debajo de los 2.5 MPA.
- Entre los 7.5 a 9.5 metros encontramos un estrato de arena en su mayoría con valores de qc en el orden de 7.5 a 10 MPA.
- Después del estrato arenoso se encuentra uno de arcilla en su mayoría que alcanza los 13 metros de profundidad con un valor de qc en su mayoría menores 2.5 MPA, pero con algunos picos que sobrepasaban ese valor.
- A los 13 metros volvemos a encontrar un estrato arenoso con limos que avanza hasta los 15.20 metros de profundidad aproximadamente. Este estrato contiene un lente de arcilla entre los 14 y 14.5 metros de profundidad. Los valores de qc para los estratos arenosos y arcillosos se encuentra en el orden de 10 MPA para el primer estrato arenosos, 2.5 MPA para la arcilla aproximadamente y valores entre 5 y 7.5 MPA para el último estrato de arena.
- Después de esto encontramos un estrato grande arcilla que avanza hasta los 29 metros de profundidad con un lente de materia orgánica entre los 19.5 a 21 metros de profundidad. Los valores de qc están alrededor de 2.5 MPA hasta los 27 metros, luego empiezan a subir hasta llegar a 20 que es considerado rechazo y da por terminado el ensayo.

Comparando las 4 perforaciones podemos ver que los estratos encontrados son muy parecidos en cuanto a su estructura y ubicación. Podemos observar que los estratos arenosos de mayor relevancia y potencialmente licuables se encuentran entre los 7 a 9.5 metros de profundidad y a entre los 13 a 15 metros según los 4 sondeos.

3.3. ENSAYOS GEOFÍSICOS (MAM – MASW)

Los ensayos geofísicos fueron realizados por el autor y la empresa CPR ASOCIADOS C. LTDA. En el mes de septiembre del 2017. La geofísica aplicada ha ganado terreno en la última década debido a los avances tecnológicos para realizar estos ensayos y distintos métodos más efectivos y accesibles. Los ensayos geofísicos son no destructivos con los cuales se tiene el objetivo de caracterizar el suelo mediante la medición de ondas receptadas por sensores o geófonos. Existen distintos tipos de ensayos que se realizan en la actualidad para este proyecto en específico se realizaron MASW Y MAM con el objetivo de encontrar velocidades de ondas de corte superficiales. El equipo utilizado para realizar estos ensayos consiste en un sismógrafo llamado GEODE de la compañía GEOMETRICS, 24 geófonos de 4.5 Hz de marca GEOSPACE, una computadora con el software SEISMODULE CONTROLLER que sirve para ingresar los parámetros para cada tipo de ensayo y guardar los datos obtenidos de los ensayos, una batería que le da poder al GEODE y un combo de 20 lbs utilizado para realizar golpes sobre un bloque de plástico. También se utilizan distintos tipos de cables: en el que van conectados los 24 geófonos, el cable que conecta a la computadora portátil y el cable del martillo o la fuente activa.

3.3.1. Ensayo MASW

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), es un método no destructivo, se usa para evaluar la velocidad de onda de corte (V_s), vinculado al mismo módulo de corte (G). Este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie desde el punto de impacto a los receptores (Park, Miller, & Xia, 1999).

Los registros se realizan con 12 o más geófonos en distancias cortas y largas desde una fuente impulsiva o vibratoria, que proporcionan una redundancia estadística para medir las velocidades de fase. Los datos multicanal permiten la identificación y rechazo de los modos no fundamentales de ondas Rayleigh, permiten también un proceso más efectivo para la eliminación del ruido y un proceso de recolección de datos más rápido (Louie, 2001).

Este ensayo se lo realizó formando una línea de 46 metros de longitud, con los 24 geófonos separados cada dos metros. El ensayo MASW realizado consistió en realizar golpes con el combo de 20 lbs. a 5, 10, 20, 40 metros de distancia con respecto al primer geófono; para generar ondas y así ser captadas por los geófonos. Este método es bueno para caracterizar los estratos hasta los primeros 23 metros de profundidad (la mitad de la línea de geófonos).



FIGURA 5: Sismógrafo GEODE de la empresa GEOMETRICS.



FIGURA 6: Equipo utilizado para realizar los ensayos.

3.3.2. Ensayo MAM

El ensayo MAM (Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanal) o pasivo es un método pasivo de exploración geofísica basado en el análisis de las vibraciones ambientales, es decir utiliza como fuente el ruido ambiental, en arreglos predeterminados y mediante el análisis de dispersión de estas, determinar el perfil de velocidades de ondas S. Para ello, este método analiza las propiedades de dispersión de los modos fundamentales de las ondas Rayleigh, las cuales se propagan a lo largo de la superficie a los receptores (Park, Miller, & Xia, 1999).

Para realizar el ensayo MAM el arreglo de los geófonos utilizado fue en forma de L con separaciones de 5 metros entre cada geófono. Y consistía en medir las vibraciones ambientales del sitio por 30 min sin utilizar una fuente externa como en el caso del MASW. El ensayo pasivo MAM es útil para caracterizar los estratos inferiores hasta los 60 metros de profundidad aproximadamente pero no se obtienen datos muy confiables a frecuencias muy altas (metros inferiores). En la Figura 7 se puede observar el arreglo de los geófonos.

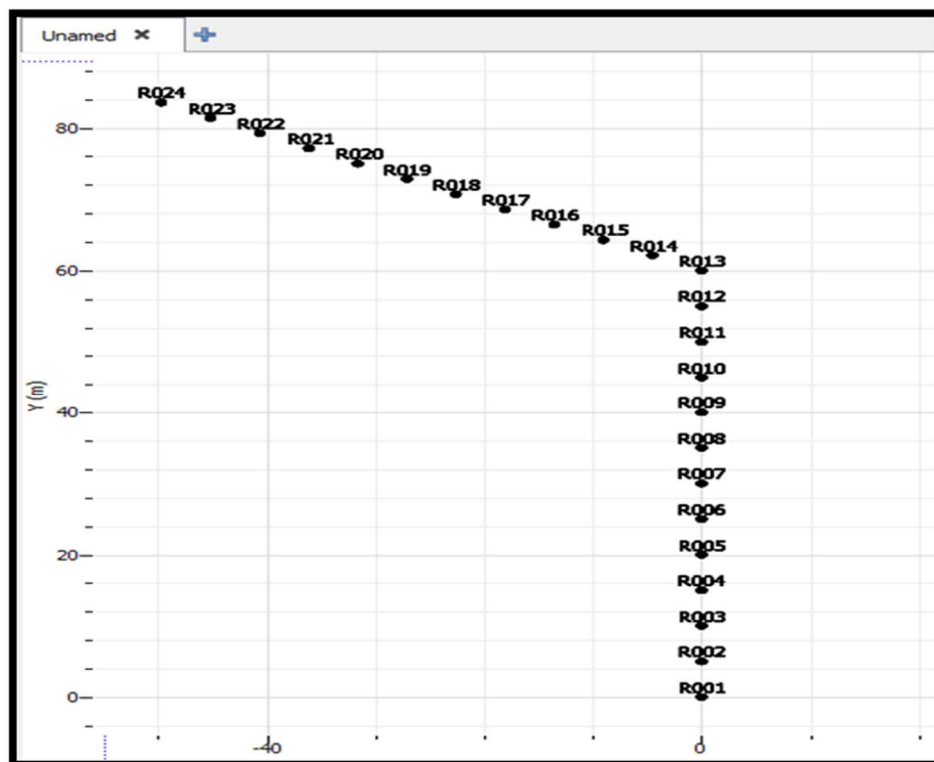


FIGURA 7: Arreglo de los geófonos (coordenadas) para el ensayo MAM. (Captura extraída de GEOPSY)

3.3.3. Procesamiento de datos

Luego de haber realizado los ensayos en campo se procedió a procesar los datos obtenidos de los 2 ensayos realizados utilizando códigos de cálculo en MATLAB, el software GEOPSY, DINVER y SEISIMAGER.

El procesamiento de datos consiste en 4 etapas: El procesamiento de los datos del ensayo activo MASW, El procesamiento de los datos del ensayo pasivo, La combinación de los datos procesados de ambos ensayos con las herramientas del programa DINVER y por último la interpretación de los resultados y la elaboración de los perfiles de suelo con sus velocidades de onda presentados en un gráfico.

Una vez realizados los ensayos y haber guardado los datos obtenidos en la Computadora portátil se comenzó con el procesamiento de los datos.

En primer lugar, se procesan los datos obtenidos del ensayo MASW utilizando pequeños programas creados en MATLAB. Primero se obtiene una curva de Dispersión de Velocidad de Fase Vs Frecuencia, pero esta curva está “sucia” con “ruido ambiental” y se tiene que limpiar. Una vez limpia (Figura 8) se procede con el procesamiento del ensayo MAM.

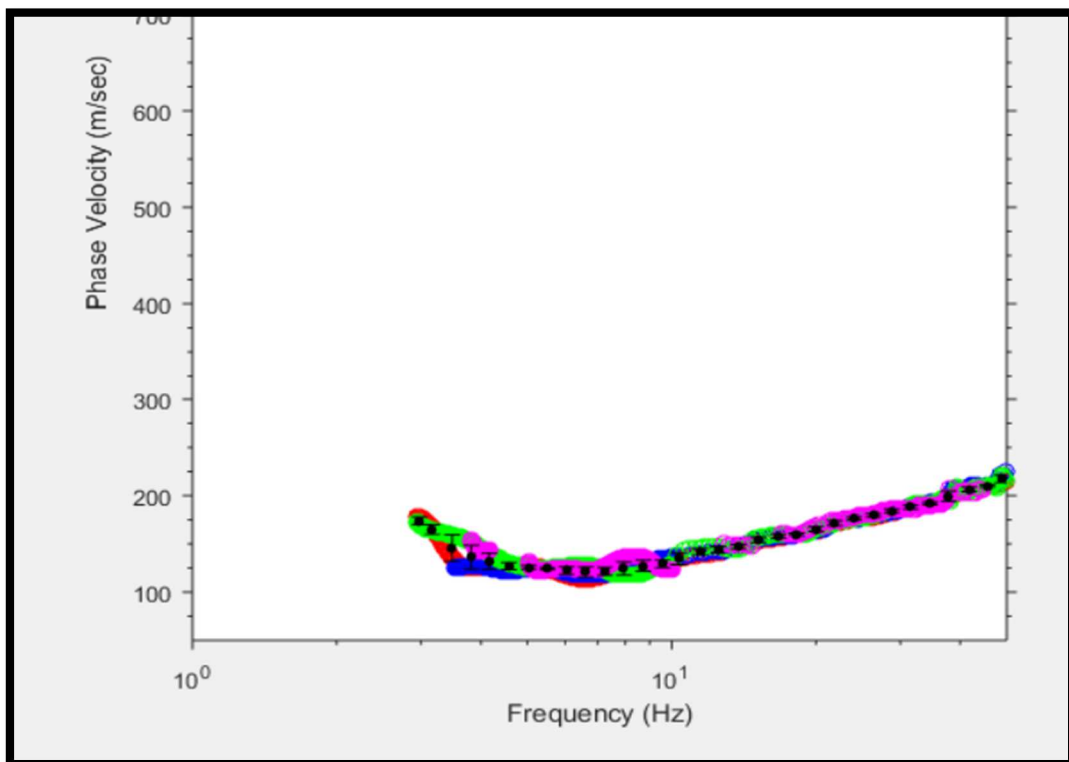


FIGURA 8: Curva de Dispersión experimental limpia del ensayo MASW. (Captura extraída de MATLAB)

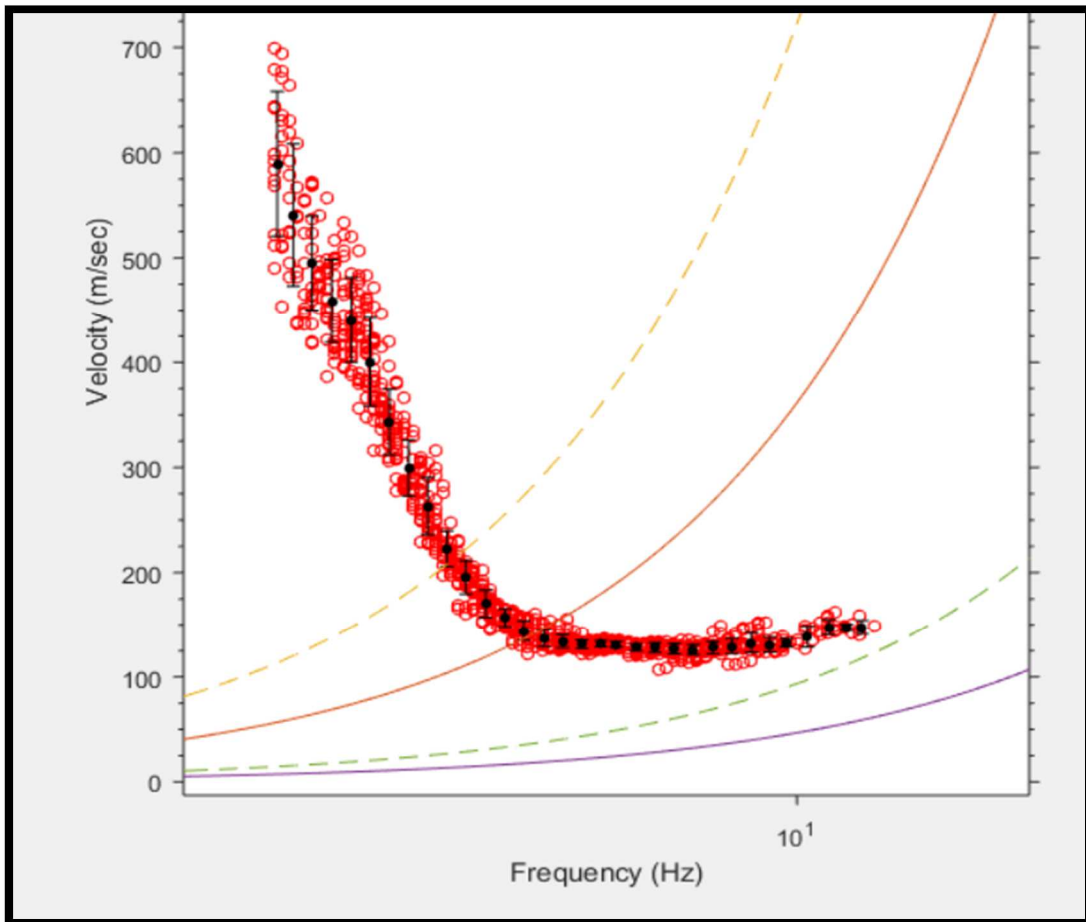


FIGURA 9: Curva de Dispersión experimental limpia del ensayo MAM.

Para procesar los datos obtenidos del ensayo MAM primero se debe crear un archivo texto tabulado que indique el arreglo y la posición de los geófonos que se utilizó durante el ensayo. Este archivo se importa al programa GEOPSY donde se procede a procesar los datos y encontrar la curva de Dispersión. Esta curva necesita limpiarse también y se lo hace en el programa MATLAB (Figura 9).

Una vez obtenida las dos curvas (MASW y MAM) se las importa al programa DINVER en donde se crea una curva promedio de ambos ensayos (Figura 10). Con la ayuda de las perforaciones aledañas y criterio ingenieril se ajusta la curva y se eligen parámetros del suelo para poder encontrar el perfil de velocidades de Onda. El programa realiza decenas de miles de iteraciones hasta encontrar el perfil que más se ajuste a la curva experimental obtenida de los ensayos. En la figura 11 se puede observar el perfil de velocidades obtenidos para el terreno del proyecto.

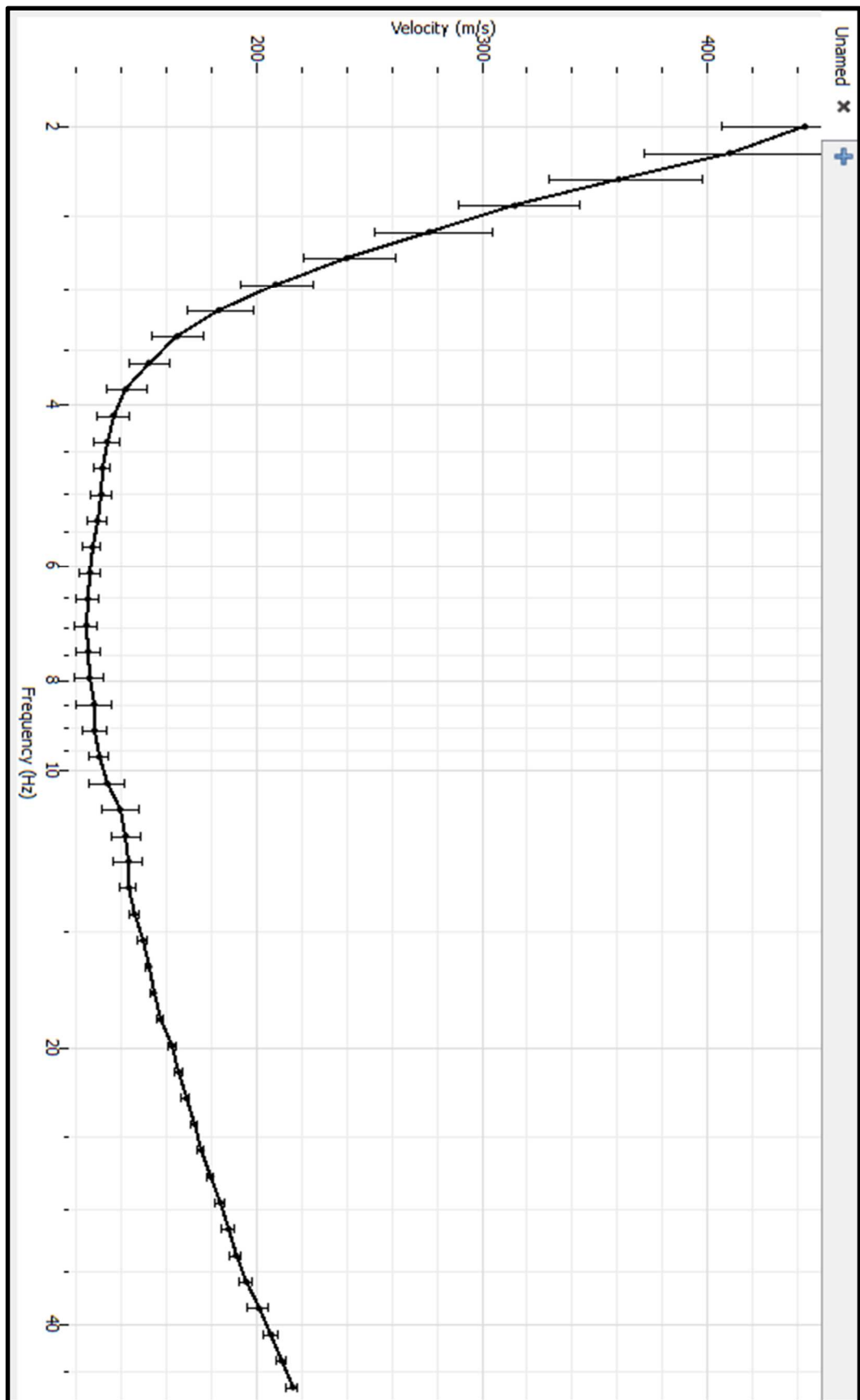


FIGURA 10: Curva de dispersión experimental promedio de los ensayos MASW y MAM (Extraída del programa DINVER)

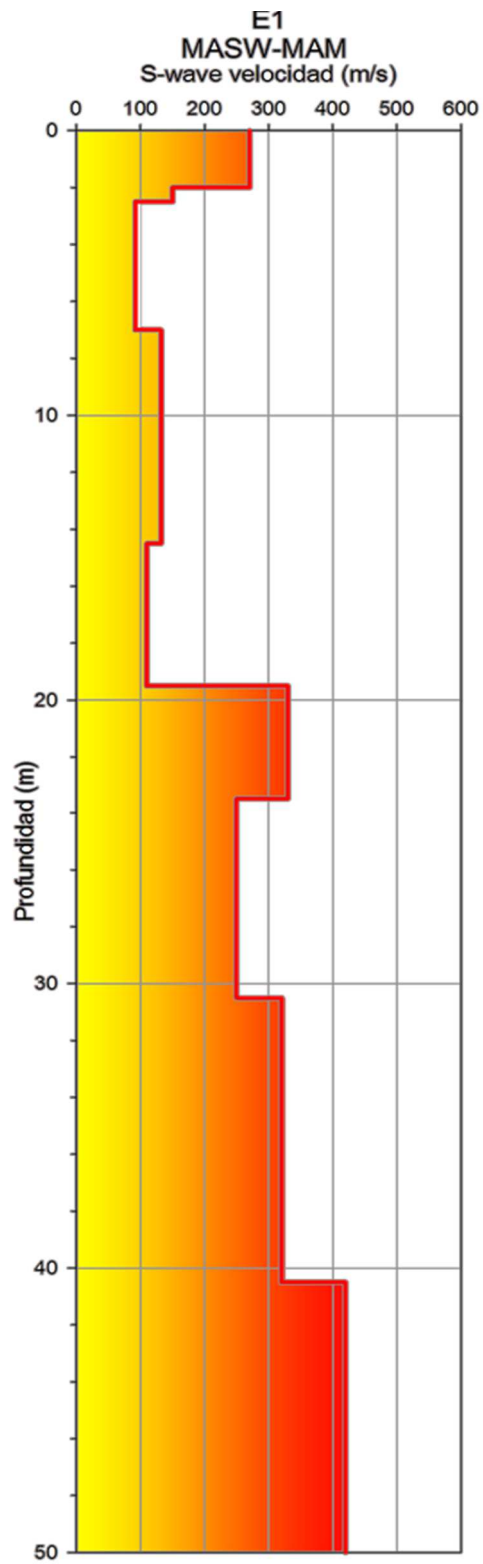


FIGURA 11: Perfil de velocidades de Ondas Cortantes Superficiales usando MASW – MAM

4. LICUACIÓN: REVISIÓN DE LITERATURA

La licuación inducida por terremotos es una causal principal de los daños por terremotos en el mundo. La licuación normalmente se describe en la literatura como el fenómeno producido por los sismos de generar exceso de presión de poros y por consiguiente el ablandamiento o pérdida de resistencia de los suelos granulares.

4.1. EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO

La Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos en su reporte del 2016 explica cómo se produce el fenómeno de la licuación: “La licuación se produce cuando las tensiones y la deformación en el suelo causadas por el movimiento de un terremoto perturban la estructura de los suelos saturados y geológicamente no consolidados. El agua retenida en los espacios vacíos entre las partículas de suelo resistirá la tendencia natural de los suelos a consolidarse en una estructura más densa durante el movimiento. Debido a que el suelo no puede cambiar de volumen hasta que se drene el agua de los poros, la presión del agua subterránea aumentará, las partículas del suelo pueden perder contacto entre sí y la masa del suelo puede perder gran parte de su resistencia”. Esto se conoce como desencadenamiento de la licuación. (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016)

Se es bien conocido que la resistencia de un suelo granular depende en su mayor parte del esfuerzo efectivo (σ'_{vc}), un suelo con mayor esfuerzo efectivo inicial o confinamiento tiende a tener una mayor resistencia (por eso las arenas a grandes profundidades suelen ser más resistentes o tener mayor número de golpes).

El esfuerzo vertical efectivo (σ'_v) es la resta del esfuerzo normal total (σ_v) menos la presión de poros interna de los suelos (u):

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (1)$$

Cuando ocurre un evento sísmico se generan esfuerzos cortantes cíclicos que van y regresan. En suelos con niveles freáticos altos (saturados) estos esfuerzos cíclicos no permiten que los suelos granulares drenen, por lo que el agua al ser incompresible no permite que el suelo cambie de volumen. Esto genera que la presión de poros aumente significativamente (para mantener el equilibrio de fuerzas) y si aumenta la presión de poros y el esfuerzo normal se mantiene constante el entonces, el esfuerzo efectivo disminuirá (puede llegar a 0) lo que producirá una pérdida de resistencia significativa e inducirá deformaciones permanentes en el terreno y daños muchos más graves. (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016)

El exceso de presión de poros (Δu) se lo relaciona con el esfuerzo efectivo vertical de consolidación (σ'_{vc}) para determinar si el suelo experimentará licuación. A este valor se lo denomina (r_u) y se lo determina mediante la siguiente ecuación:

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vc}} \quad (2)$$

El valor máximo posible de r_u es 1 cuando el exceso de presión de poros iguala al esfuerzo vertical efectivo, esto se considera por muchos autores como “Licuación Inicial”, pero según (Idriss & Boulanger, 2008) es mejor utilizar la frase “Exceso de la relación de presión de poros de 100%”.

4.2. CSR Y CRR

La resistencia de una arena a desarrollar licuación depende de muchos factores, incluyendo el número de ciclos de carga, densidad relativa, esfuerzo de confinamiento, tipo de deposición, historia previa de esfuerzos y deformaciones, cementación, y otros factores externos. (Idriss & Boulanger, 2008)

La licuación de arenas saturadas puede desencadenarse por diferentes combinaciones de relación de esfuerzos cortantes cíclicos uniformes (CSR por sus siglas en inglés “Cyclic shear stress ratio”), que es el esfuerzo cortante cíclico uniforme dividido para el esfuerzo efectivo inicial de confinamiento y el número de ciclos de cargas (N). Un mayor CSR podrá desencadenar licuación ($r_u=1$ o 100%) en pocos ciclos de carga, mientras que, un menor CSR requerirá más ciclos de cargas (Idriss & Boulanger, 2008). Este comportamiento se puede ver en el siguiente gráfico que ilustra los resultados de la mesa vibratoria de los ensayos de (DeAlba, Seed, & Chan, 1976). Para este ensayo el CSR es definido como el esfuerzo de corte cíclico (τ_{cyc}) actuando en planos horizontales dividido para el esfuerzo vertical de consolidación (σ'_{vc}):

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{vc}} \quad (3)$$

Mientras que el CSR para el ensayo cíclico triaxial consolidado es definido como el máximo esfuerzo cíclico de corte ($q_{cyc}/2$) dividido para el esfuerzo de consolidación isotrópico (σ'_{3c}) (Idriss & Boulanger, 2008):

$$CSR = \frac{q_{cyc}}{2\sigma'_{3c}} \quad (4)$$

El CSR que es requerido para alcanzar la licuación en un número específico de ciclos de carga también puede ser llamado la relación cíclica de resistencia de arenas (CRR) (Idriss & Boulanger, 2008). La relación entre los ciclos de carga (N) puede ser aproximada a,

$$CRR = aN^{-b} \quad (5)$$

Se produce la licuación en las arenas cuando el factor de seguridad que es la relación entre el CSR sobre el CRR es menor como se explica en la siguiente ecuación.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (6)$$

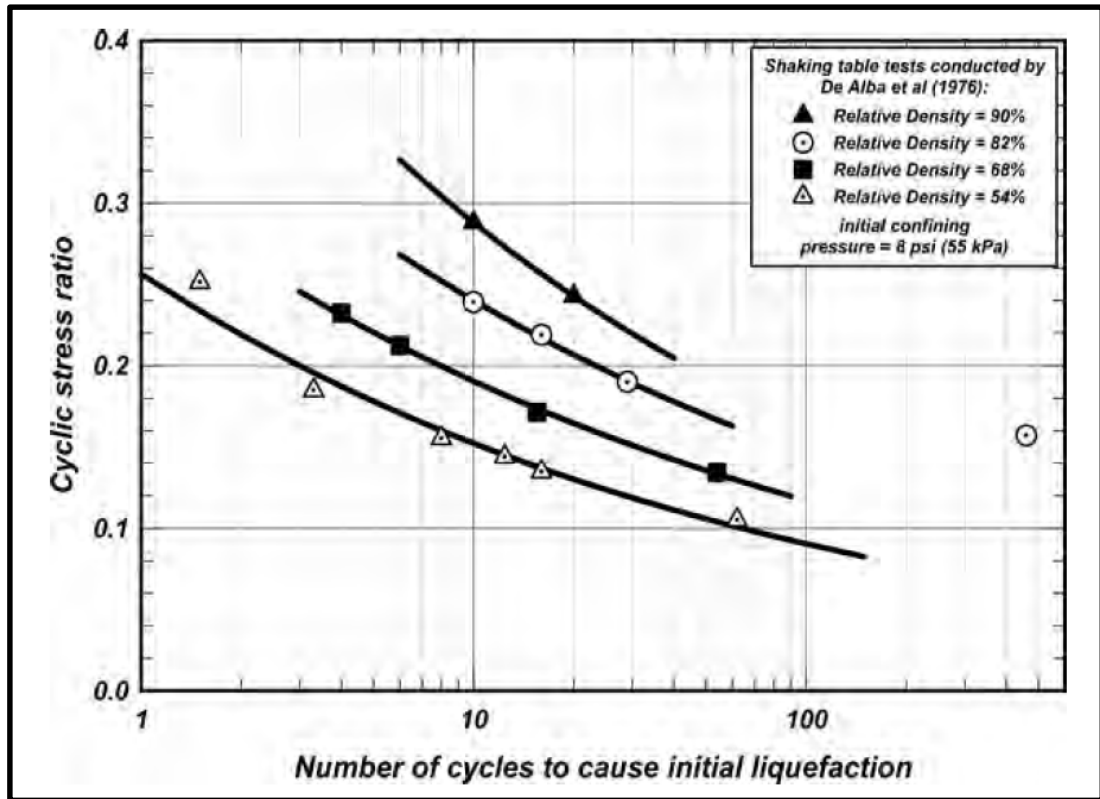


FIGURA 12: El valor de CSR para alcanzar la licuación inicial ($r_u=100\%$) para el ensayo de mesa vibratorio realizado por (DeAlba, Seed, & Chan, 1976)

4.3. CRITERIOS DE SUSCEPTIBILIDAD

En este capítulo se hablará un poco de los criterios de la literatura utilizados para determinar la susceptibilidad de un suelo a licuarse en el proyecto.

No todos los suelos granulares son licuables, dependen del porcentaje de finos, índice de plasticidad, límite líquido y porcentaje de humedad. Según el tipo de criterio los limos de baja plasticidad pueden ser susceptibles a licuación.

4.3.1. Bray and Sancio (2006)

Este criterio fue desarrollado después de los estudios realizados para los suelos que se licuaron con los terremotos de Northridge (1994), Kocaeli (1999) and Chi - Chi (1999). Luego de este estudio se pudo determinar que el Criterio Chino que por mucho tiempo fue ampliamente aceptado no estaba del todo

correcto, debido a que, mucho de los suelos que experimentaron licuación en los terremotos anteriormente nombrados poseían un porcentaje alto de finos y no cumplían el criterio de tamaño de partícula de arcilla del Criterio Chino (Bray & Sancio, 2006).

Este criterio expresa que un suelo con alto contenido de finos, joven y superficial puede ser susceptible a licuación en un sismo si cumple con los criterios de $W_c/LL > 0.85$ e $IP < 12\%$.

Bray y Sancio en su trabajo del 2006 expresan las siguientes conclusiones:

- “El criterio de W_c/LL parece ser bastante confiable para determinar la susceptibilidad de un suelo con altos porcentajes de finos a experimentar licuación. Para suelos finos con similares esfuerzos de confinamiento, una relación W_c/LL más baja es indicador de un OCR y una resistencia al corte no drenado mayor. Es poco probable que los suelos plásticos de grano fino con $W_c/LL < 0.8$ sean susceptibles a licuarse y aquellos con una alta relación de $W_c/LL (> 1)$ son los principales candidatos para licuarse, especialmente si el suelo es de baja plasticidad.”
- “El criterio de IP es un buen indicador de susceptibilidad de licuación, pero debe verse más como un índice de susceptibilidad más que un criterio absoluto. Uno no debería esperar un cambio en el comportamiento de un suelo fino en la transición de IP 11 a 13. Los resultados del estudio demuestran claramente que suelos finos, no plásticos, jóvenes y superficiales con baja plasticidad ($IP < 12$) y una alta relación de contenido de húmedas para límite líquido ($W_c/LL > 0.85$) pueden licuarse bajo la acción de ciclos de cara significantes.”
- “También los limos arcillosos o arcillas limosas son moderadamente susceptibles a sufrir licuación bajo un número alto de ciclos de carga si cumplen con $W_c/LL > 0.8$ y $12 < IP < 18$. Pueden existir suelos sensitivos que con valores de $IP > 18$ pueden sufrir una gran pérdida de resistencia bajo los esfuerzos cíclicos inducidos por un sismo.”

Bray y Sancio (2006) recomiendan utilizar este método para evaluar la susceptibilidad de un suelo a licuarse para la práctica ingenieril y dejar de utilizar el Criterio Chino. Los suelos que cumplen con $W_c/LL < 0.8$ y $12 < IP < 18$ deberían ser ensayados, pero para la práctica ingenieril y ahorro de tiempo y dinero se puede asumir que pueden experimentar licuación y evaluarla (conservadoramente).

En la figura 13 pueden observar las distintas evaluaciones de susceptibilidad usando este criterio para distintos lugares que sufrieron licuación:

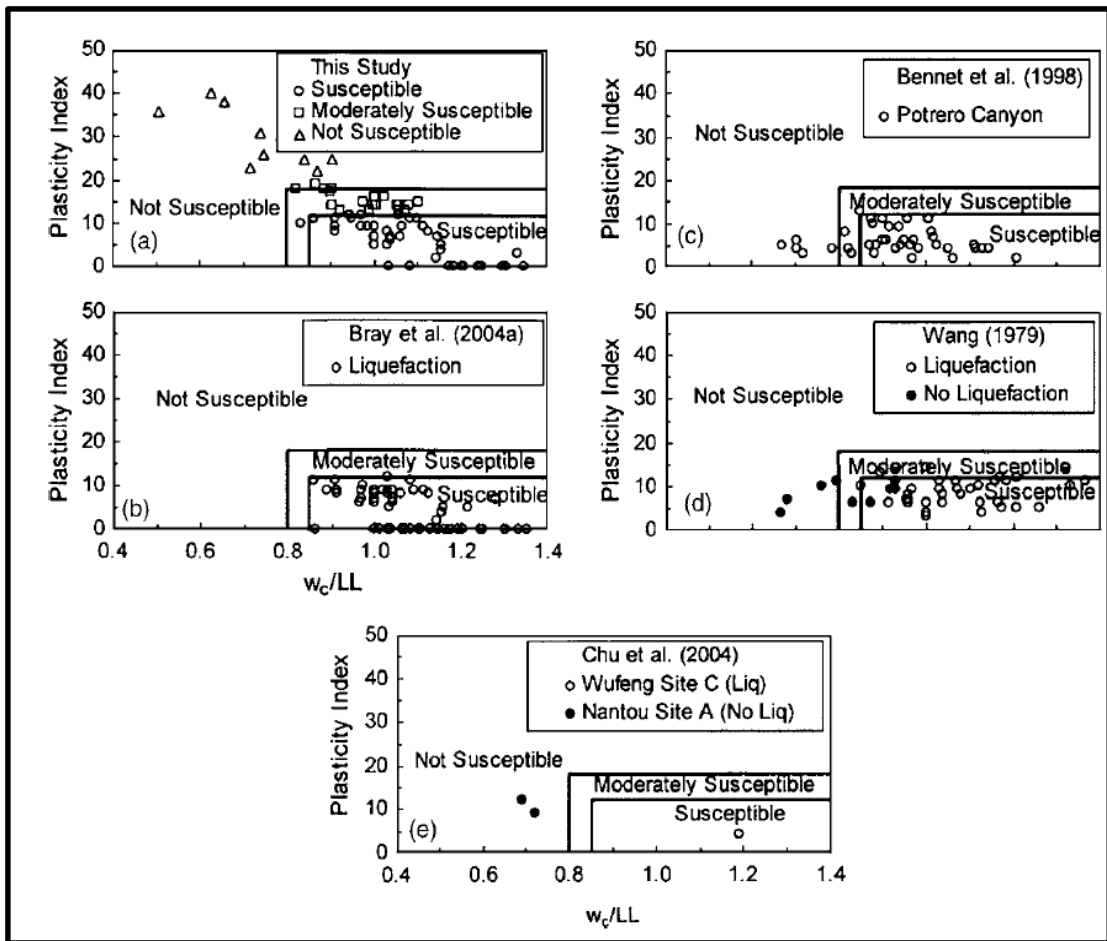


FIGURA 13: Representación gráfica del criterio de susceptibilidad de Bray y Sancio (2006): (a) datos del ensayo CTX isotrópicamente consolidado realizado por Bray y Sancio (2006), (b) datos de campo realizado por Bray et al. (2004), (c) datos de campo de Potrero Canyon realizado por Bennett et al. (1998), (d) datos de campo realizado por Wang (1979) y (e) Datos de campo realizados por Chun et al. (2004)

Como se puede ver en la figura (d) suelos que no se licuaron cumplían el criterio de Bray y Sancio (2006), lo cual indica que no es un criterio absoluto, pero sí parece ser bastante confiable.

4.3.2. Boulanger & Idriss (2006)

En este trabajo Boulanger e Idriss separan los comportamientos de los suelos a licuación en dos grupos: Comportamiento como Arcillas y Comportamiento como arenas.

Para los suelos de grano fino que se comportan más fundamentalmente como las arcillas, la resistencia de corte monotónica no drenada está estrechamente relacionada y muestra comportamientos de historia-esfuerzo únicos y normalizados. La resistencia cíclica puede entonces ser evaluada en base a la información de pruebas de sitio, ensayos de laboratorio y correlaciones

empíricas que son similares a, o se basan en, los procedimientos establecidos para evaluar la resistencia de corte monotónicas no drenadas de dichos depósitos (Boulanger & Idriss, 2004). Para los suelos de grano fino que se comportan fundamentalmente como arena, la resistencia cíclica debe ser estimada en el marco de correlaciones existentes basadas en CPT y SPT. Para propósitos prácticos, los suelos finos se pueden esperar con seguridad que se comporten como arcilla si su $IP \geq 7$. Este criterio provee una interpretación un poco conservativa del comportamiento de transición (Figuras 14 y 15), e incluye todos los suelos CL por definición. Si un suelo se considera como CL-ML, el criterio de IP puede reducirse a $IP \geq 5$ y puede ser consistente con los datos disponibles. Suelos finos que no cumplan con este criterio deben ser considerados probablemente exhibiendo un comportamiento como arena (licuable), a menos que, se demuestre lo contrario a través de pruebas in situ y de laboratorio detalladas. Suelos finos con IP entre 3 – 6 pueden presentar comportamiento intermedio, de modo que las pruebas in situ y de laboratorio detalladas aún pueden proporcionar beneficios en relación con la confianza en correlaciones basadas en ensayos SPT y CPT por sí solas. Por lo tanto, los criterios propuestos proporcionan una guía de evaluación razonable, después de lo cual los beneficios potenciales de programas de prueba in situ y de laboratorio más detallados pueden evaluarse en relación con la heterogeneidad del sitio, el nivel de riesgo sísmico y otras condiciones específicas del proyecto. (Boulanger & Idriss, 2006)

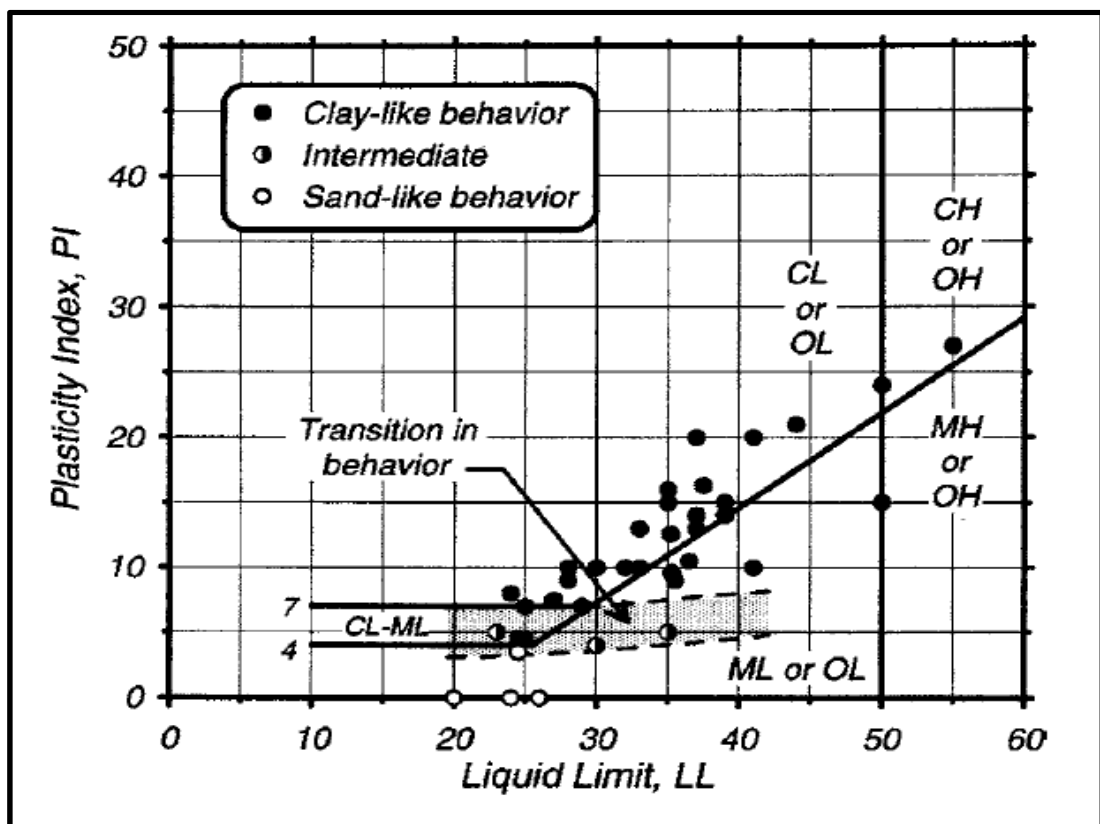


FIGURA 14: Cuadro de límites de Atterberg mostrando valores representativos para suelos que exhiben comportamiento como arcillas, arena o de transición. (Boulanger & Idriss, 2006)

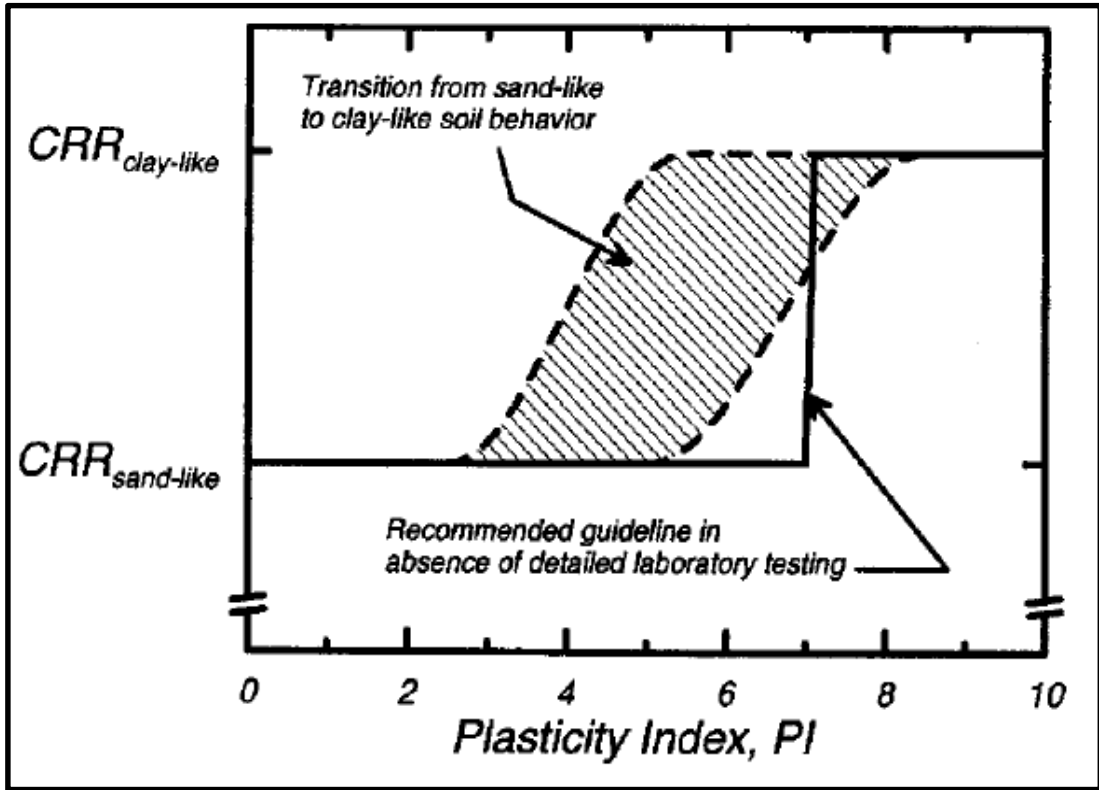


FIGURA 15: Ilustración esquemática de la transición de comportamiento como arena a comportamiento como arcilla con el incremento de PI, y una línea guía recomendada para la práctica. (Boulanger & Idriss, 2006)

En su trabajo del 2006 Boulanger e Idriss recomiendan discontinuar el criterio chino.

4.3.3. Estimación de contenido de finos y clasificación de suelos utilizando datos de CPT (Boulanger & Idriss, 2014)

El contenido de finos (FC) y la clasificación de suelos están a menudo correlacionados con el índice de comportamiento de suelo (I_c) que es función de la resistencia de punta CPT y relación de fricción lateral. El I_c recomendado por Robertson y Wride (1998) es calculado como,

$$I_c = [(3.47 - \log(Q))^2 + (1.22 + \log(F))^2]^{0.5} \quad (7)$$

Donde Q y F son normalizados la punta y la fricción lateral y son calculados como,

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{vc}}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^n \quad (8)$$

$$F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_{vc}} \right) \cdot 100\% \quad (9)$$

Los términos Q y F son usados en la clasificación del comportamiento de suelo, tales como el cuadro mostrado en la figura 16 por Robertson (1990). El exponente n varía entre 0.5 para arenas y 1.0 para arcillas (Robertson & Wride, Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetretation test, 1998). El termino I_c representa la distancia radial entre cualquier punto del cuadro y el punto definido por $Q= 2951$ y $F= 0.06026\%$. Los valores para los arcos circulares definidos por la constante I_c son usados para aproximar los límites entre los diferentes tipos de comportamiento de suelos mostrados en el cuadro, por ejemplo, $I_c=2.05$ representa el límite aproximado entre comportamiento de los suelos 5 y 6 mientras que $I_c=2.6$ representa el límite aproximado entre los suelos 4 y 5 Robertson (2009).

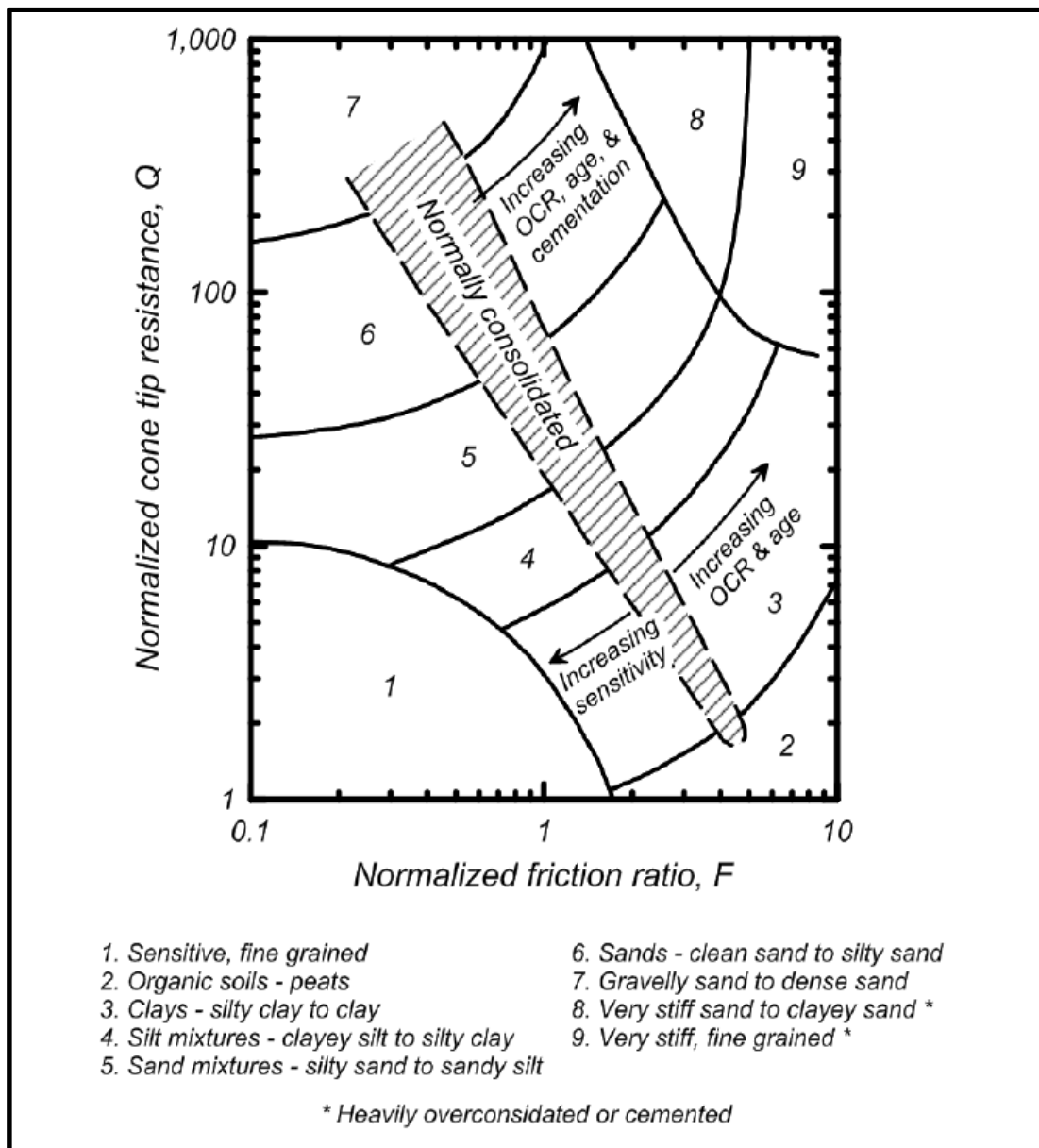


FIGURA 16: Cuadro de clasificación de comportamiento de suelo. (Robertson P. K., 1990)

Debido a que las correlaciones entre FC e I_c basadas en CPT presentan gran dispersión, se recomienda realizar una calibración específica para el sitio de estudio. Esta incertidumbre fue estudiada por varios autores que han propuesto curvas en base a los datos obtenidos de correlaciones entre FC e I_c en donde se presentan varios datos obtenidos y se puede notar la gran dispersión dicha anteriormente (Boulanger & Idriss, 2014). Estos datos están expuestos en la figura 17.

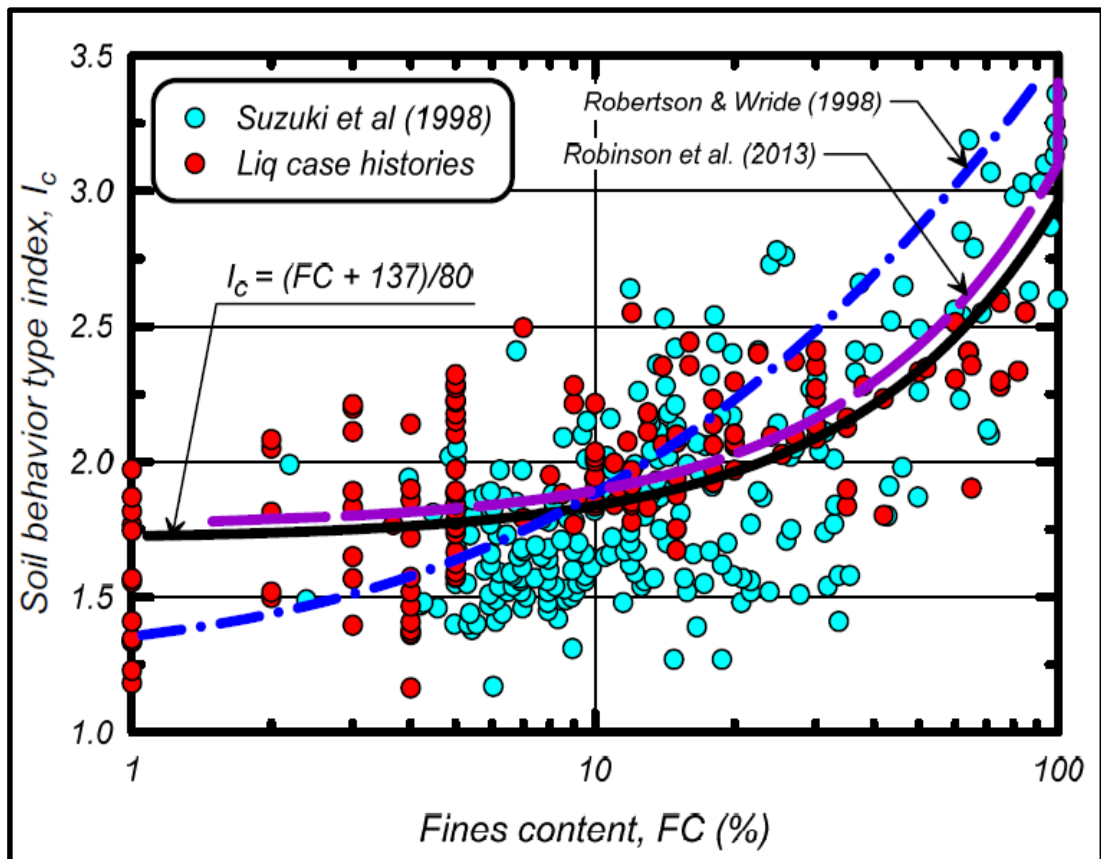


FIGURA 17: Datos y correlaciones entre I_c vs FC (Boulanger & Idriss, 2014)

En el trabajo de Boulanger e Idriss (2014) la relación para estimar FC fue desarrollada en primer lugar haciendo una regresión de I_c vs FC usando los datos combinados de los datos presentados en la figura 15 y así obteniendo la curva más ajustada,

$$I_c = \frac{(FC + 137)}{80} + \varepsilon \quad (10)$$

Donde (ε) es un error, que se encontró que tenía una media de 0 y una desviación estándar de 0,29 y no tenía relación frente a FC. Esta ecuación puede entonces ser invertida para proveer la siguiente forma de estimar FC,

$$FC = 80(I_c + C_{FC}) - 137 \quad (11)$$

$$0\% \leq FC \leq 100\%$$

Donde C_{FC} es un parámetro de ajuste y que debe ser calibrado en base a datos específicos en el sitio cuando se posible. La convención de signos para C_{FC} es opuesta a la del error ε de la ecuación (10) entonces un valor positivo de C_{FC} corresponde a un mayor valor estimado FC. Esta expresión con $C_{FC}=0.0$, -0.29 , and 0.29 (+/- es igual a la desviación estándar en una correlación general) se muestra en la figura 18. El valor de C_{FC} puede ser calibrado para los datos específicos del sitio haciendo una regresión de I_c vs FC usando la siguiente ecuación.

$$I_c = \frac{(FC + 137)}{80} - C_{FC} \quad (12)$$

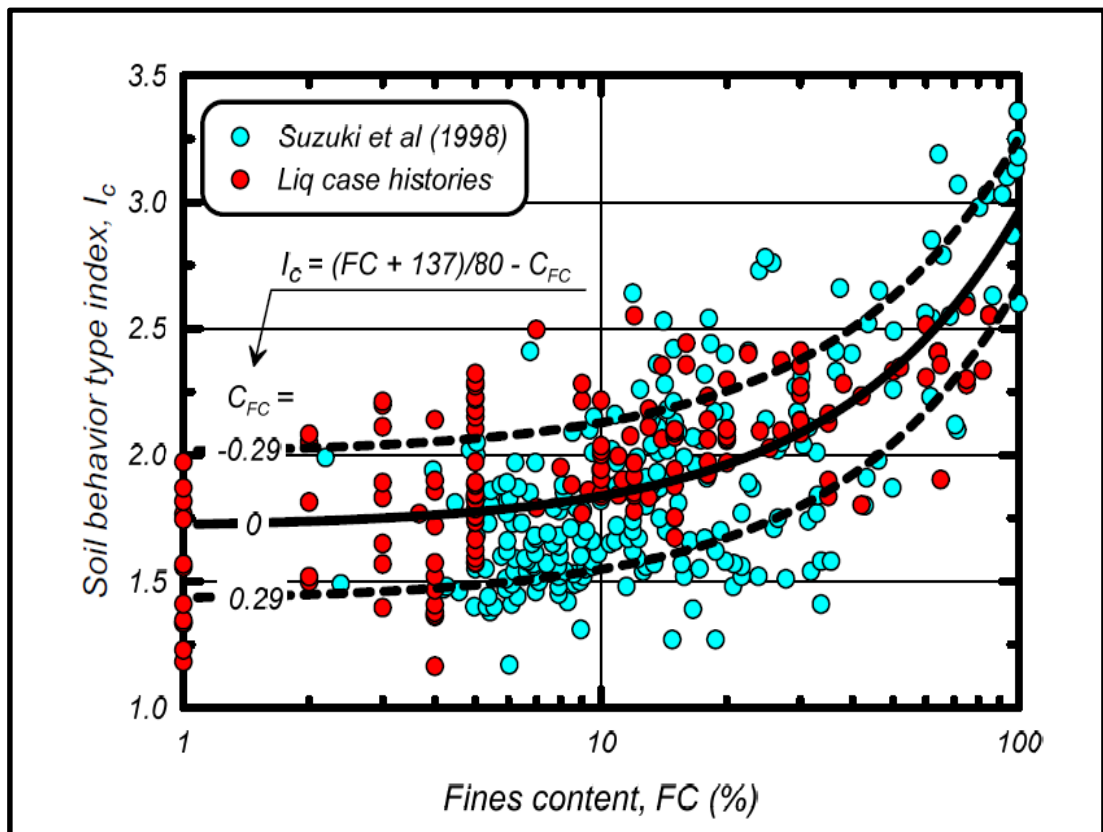


FIGURA 18: Correlación recomendada entre I_c vs FC con una desviación estándar positiva y negativa usando los datos de Suzuki et al. (1998) y los datos de Boulanger e Idriss. (Boulanger & Idriss, 2014)

4.4. MÉTODO SIMPLIFICADO (Seed & Idriss, 1971)

4.4.1. Factores fundamentales que influyen el potencial de Licuación

Seed e Idriss en su monografía (A SIMPLIFIED PROCEDURE FOR EVALUATING SOIL LIQUEFACTION POTENTIAL, 1971) exponen 5 factores fundamentales en los que influyen en el potencial de licuación que son los siguientes:

1. Tipo de suelo: Es evidente que el tipo de suelo que es susceptible a experimentar licuación debe cumplir algunos parámetros necesarios para ser caracterizado como potencialmente licuable. Estos parámetros pueden ser tamaño de partícula, índice de plasticidad, relación contenido de humedad vs límite líquido (W_p/LL), etc. Es evidente que en un suelo arcilloso o limoso de alta plasticidad no se espera encontrar licuación y un suelo gravoso es menos susceptible que una arena fina.
2. Densidad relativa o porcentaje de vacíos: Se conoce que la densidad relativa de un suelo es inversamente proporcional a su porcentaje de vacíos (a mayor densidad relativa menor porcentaje de vacíos). Mientras más denso o menor porcentaje de vacíos tiene un suelo es menos susceptible a licuación. Por ejemplo, un suelo de una densidad relativa baja (40%) puede experimentar licuación sometido a cargas cíclicas, pero el mismo suelo sometido a las mismas cargas probablemente no experimente si su densidad relativa es muy alta (80%).
3. El esfuerzo inicial de confinamiento: Seed e Idriss (1971) aseguran que hasta ese momento existía una gran cantidad de evidencia que bajo las cargas cíclicas de un sismo el potencial de licuación de un suelo disminuye si aumenta su esfuerzo de confinamiento. Esto puede explicar porque no se puede evidenciar licuación en suelos que cumplen los parámetros necesarios para licuarse que están por debajo de los 20 metros de profundidad.
4. La intensidad del sismo (aceleración del suelo): Para un suelo con una condición y esfuerzo de confinamiento dado, la vulnerabilidad a licuarse depende estrechamente de la magnitud de los esfuerzos o deformaciones inducidos por un sismo en el terreno de estudio (La intensidad del movimiento en el sitio). La intensidad del sismo o movimiento se representa por la aceleración del suelo que experimenta

durante un terremoto. Es por eso importante estimar la máxima aceleración que puede sufrir el sitio bajo el efecto de un terremoto.

5. Duración del terremoto: La duración de un sismo es un factor importante para determinar el potencial de licuación de un sitio en específico porque determina el número de ciclos de esfuerzo o deformaciones esperados para un evento dado. La intensidad del sismo o los esfuerzos y deformaciones esperados por este no es determinante en el potencial de licuación si es que no se conoce el número de ciclos o duración asociados. La aceleración del terreno puede ser suficientemente alta, pero si el tiempo de duración del movimiento es muy corto es muy probable que no se desencadene la licuación el terreno. Un ejemplo de esto fue lo sucedido en Anchorage durante el terremoto de Alaska en 1964 donde se produjeron deslizamientos debido a la licuación. Los deslizamientos no se produjeron hasta después de 90 segundos de que comenzara el movimiento del terreno (Shannon and Wilson Inc., 1964) demostrando la necesidad de generar suficientes ciclos de carga para inducir la licuación, si el movimiento duraba mucho menos (45 segundos probablemente) no se hubieran producido estos deslizamientos.

4.4.2. Método general para evaluar el potencial de licuación

Utilizando los factores fundamentales mencionados en el literal anterior Seed e Idriss en su trabajo (Analysis of soil liquefaction: Nigata Earthquake, 1967) proponen un método para evaluar el potencial de licuación utilizando los siguientes pasos:

1. Luego de haber determinado las condiciones del suelo y el sismo de diseño característico del sitio, hay que determinar la historia de tiempo de los esfuerzos de corte producidos por el terremoto a distintas profundidades.
2. Mediante la correcta ponderación de los niveles de esfuerzo involucrados en los varios ciclos de carga durante el terremoto, se convierte la historia de esfuerzos en un número de ciclos de carga uniforme equivalente y se lo grafica en función de la profundidad como se muestra en la figura 19. Esta curva toma en cuenta la intensidad del movimiento, los ciclos de carga y la variación del esfuerzo cortante con la profundidad.
3. Utilizando los ensayos de laboratorios conocidos en muestras de suelo representativas, realizados para varios esfuerzos de confinamiento, se determinan los ciclos de esfuerzo de corte a distintas profundidades necesarios para producir licuación en el mismo número de ciclos de

carga como se determinó en el literal 2. Esta curva también se la grafica en función de la profundidad y se muestra en la figura 19.

4. Comparando ambas curvas se determina la zona o la posición de los estratos donde pueda ocurrir la licuación (cuando los ciclos de esfuerzo de corte producidos por el sismo son mayores a los necesarios para causarla).

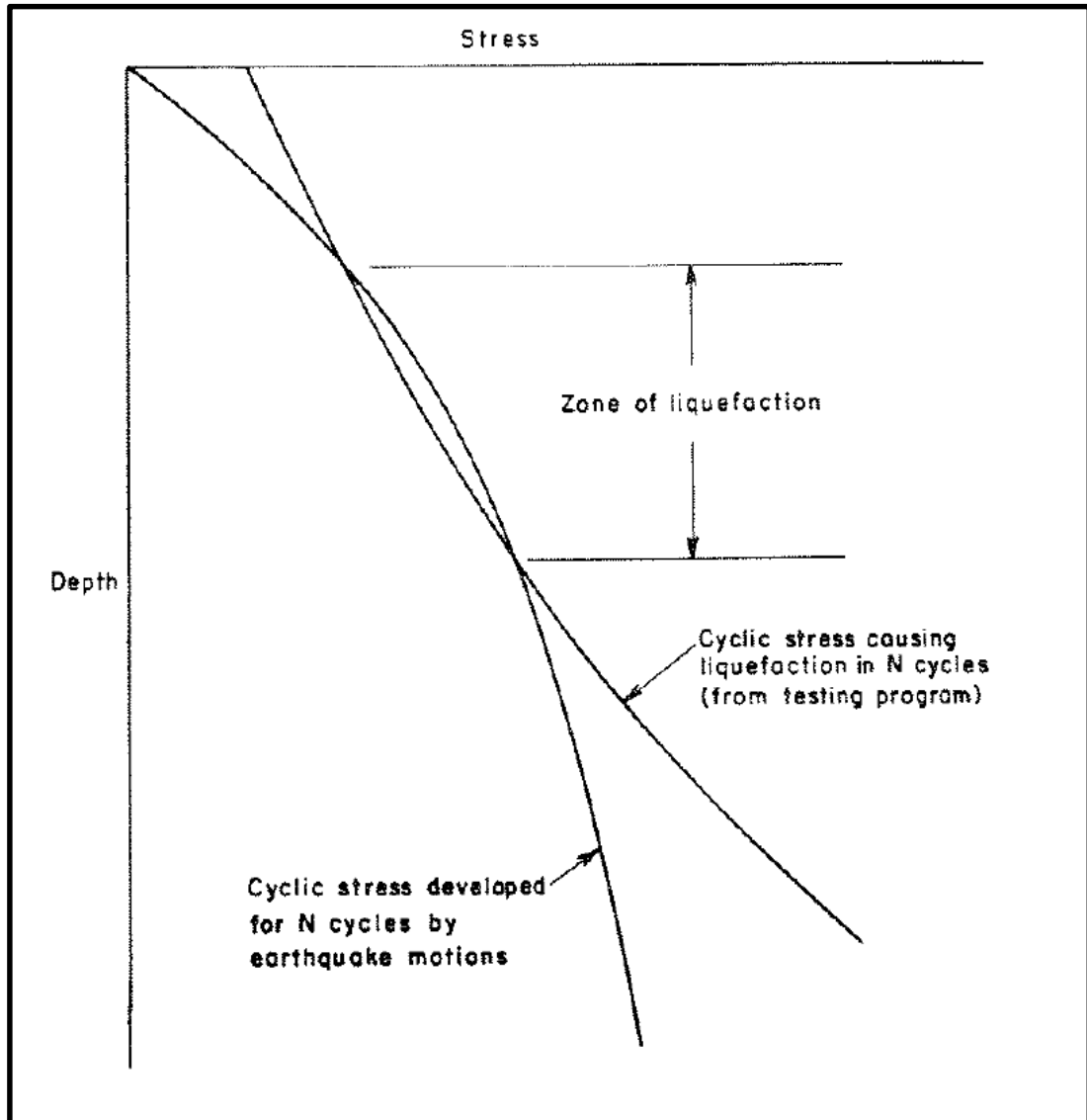


FIGURA 19: Método general para evaluar el potencial de licuación. (Seed & Idriss, 1967) Extraído de (Seed & Idriss, 1971)

Para aplicar este método la historia de esfuerzos a distintas profundidades puede ser determinada por un análisis de respuesta de sitio. Lamentablemente estos análisis y los ensayos de laboratorios no son accesibles para todos los proyectos y menos en la época en la que se desarrolló el método, por lo cual surgió la necesidad de elaborar un método simplificado.

4.4.3. Método Simplificado

Como se dijo en el literal anterior, en esa época era una necesidad tener un método simplificado debido a que los ensayos necesarios para la evaluación del potencial de licuación eran muy costosos o difíciles de hacer, en cambio se tenían muchos registros de ensayos de penetración, por esto Seed e Idriss en 1971 propusieron el método explicado a continuación.

Si una columna de suelo encima de una profundidad z se comporta como un suelo rígido, como se muestra en la figura 20, entonces el máximo esfuerzo cortante en la base de la columna puede ser calculado como el producto de su masa y la máxima aceleración horizontal de la superficie (Idriss & Boulanger, 2008):

$$(\tau_{max})_r = \frac{\gamma \cdot z}{g} (a_{max}) = \sigma_v \frac{a_{max}}{g} \quad (13)$$

Donde a_{max} es la máxima aceleración esperada de la superficie del suelo, y es el peso específico promedio encima de la profundidad z y σ_v es el esfuerzo total vertical a la profundidad z . Lo anterior es una aproximación ideal, la columna de suelo se comporta como un cuerpo deformable, por lo tanto, el máximo esfuerzo de corte difiere del valor para un cuerpo rígido con la misma aceleración máxima superficial del suelo. Entonces, el máximo esfuerzo de corte para un cuerpo deformable puede ser determinado por un análisis dinámico de respuesta de sitio, y los resultados pueden ser comparados al caso de un cuerpo rígido de la siguiente manera (Idriss & Boulanger, 2008):

$$(\tau_{max})_d = r_d (\tau_{max})_r \quad (14)$$

Donde r_d es un coeficiente de reducción del esfuerzo cortante. Las variaciones de $(\tau_{max})_d$ y $(\tau_{max})_r$ normalmente tendrán la forma de mostrada en la figura 20, por lo tanto, el valor de r_d disminuirá de un valor de 1 en la superficie del terreno hasta valores muy bajos a grandes profundidades.

Idriss (1999) luego de varios ensayos de respuesta de sitio, concluyó que el coeficiente r_d depende directamente de la profundidad z y la magnitud de Momento (M). Se presenta la siguiente expresión derivada de esos resultados

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M) \quad (15)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (16)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (17)$$

En donde z está en metros, M es la magnitud de momento y los valores dentro de los términos de seno están en radianes. Las ecuaciones 15 – 17 son aplicables para $z \leq 34\text{m}$, sin embargo, la incertidumbre de r_d crece a medida que se avanza en la profundidad por lo que estas ecuaciones deben aplicarse a una profundidad máxima de 20 metros (Idriss & Boulanger, 2008).

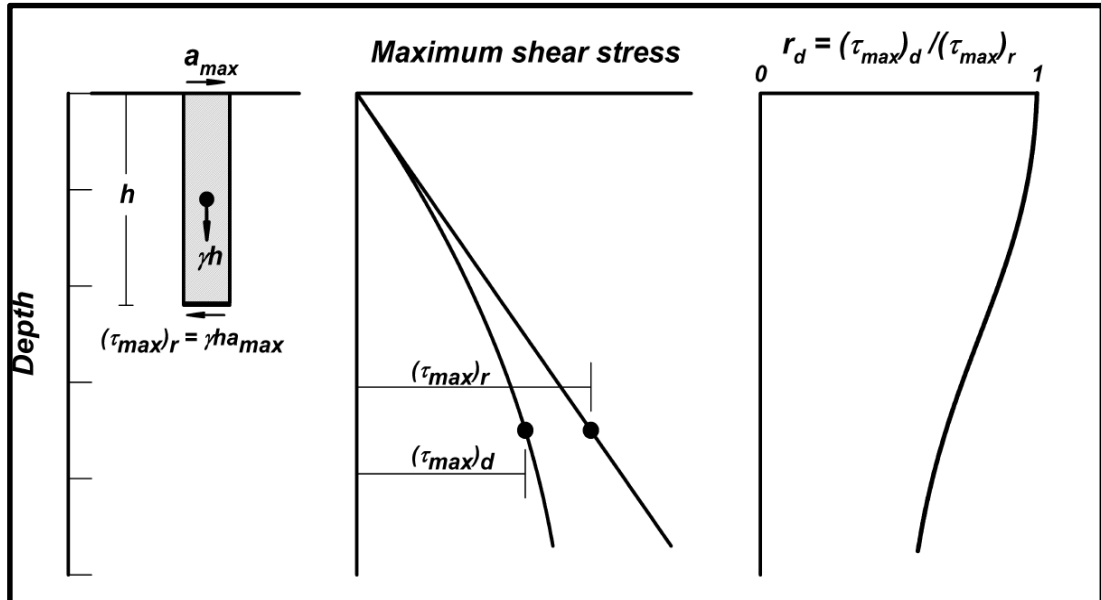


FIGURA 20: Esquema para determinar el máximo esfuerzo de corte y el coeficiente de reducción, r_d . (Idriss & Boulanger, 2008)

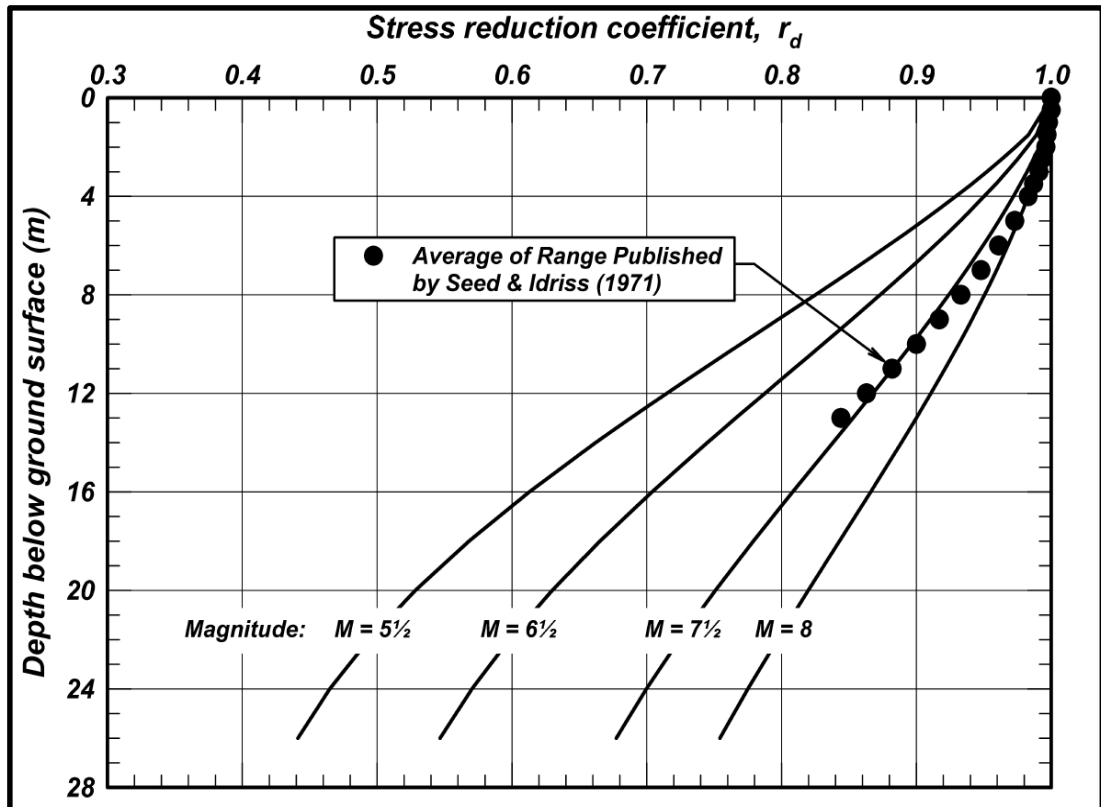


FIGURA 21: Variaciones del coeficiente de reducción de estrés r_d con la profundidad y la magnitud de momento (Idriss I. M., 1999)

En la figura 19 se muestran las curvas del coeficiente r_d calculadas con las ecuaciones 15 – 17 para distintas magnitudes de terremoto. También se presenta el rango promedio presentado por Seed e Idriss (1971). Esta figura indica que el promedio de ese rango es comparable con el calculado con las ecuaciones anteriores con un $M=7.5$ para profundidades de hasta 14 metros.

Como se expresó en la sección 4.4.2. se debe transformar la historia tiempo de los esfuerzos cíclicos inducidos por un terremoto a una historia tiempo uniforme de esfuerzos cíclicos con un equivalente número de ciclos.

Seed e Idriss (1971) escogieron para representar los esfuerzos cíclicos inducidos por un terremoto un valor representativo igual al 65% del esfuerzo cíclico pico. Entonces el CSR correspondiente al inducido por el terremoto es calculado como:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{\tau_{max}}{\sigma'_{vc}} \right) = 0.65 \frac{\sigma_{vc}}{\sigma'_{vc}} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (18)$$

El 0.65 es un tanto arbitrario, pero fue el seleccionado en el comienzo del desarrollo de los procedimientos de evaluación de la licuación en 1966 y se ha usado desde entonces. (Idriss & Boulanger, 2008)

El método simplificado es la base para todas las metodologías existentes actualmente.

5. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SITIO

5.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

5.1.1. Propiedades de los ensayos SPT

Para los ensayos de penetración estándar (SPT) los parámetros básicos son: el contenido de finos (FC%), el contenido de humedad (Wc%), el límite líquido (LL), el índice de plasticidad (IP), El número de golpes (N), el confinamiento (K) y el esfuerzo efectivo vertical inicial (σ'_{vc}). En las tablas 2 y 3 se presenta un resumen de las perforaciones con sus respectivas propiedades físicas. En los anexos se muestran los resúmenes de las perforaciones realizadas por la empresa NYLIC.

SONDEO SPT S-12							
PROF (M)	SUCS	FC (%)	N	N(60)	W	LL %	IP %
0 - 5.25	-	-	-	-	-	-	-
5.25 - 5.75	SC	32	1	1	42	53	32
5.75 - 6.43	CH	97	2	1	95	107	72
6.43 - 7.3	SC	44	4	3	57	45	22
7.3 - 7.85	SM	23	12	9	41	NP	NP
7.85 - 8.35	SP - SM	8	8	6	32	NP	NP
8.35 - 8.85	SM	16	16	11	31	NP	NP
8.85 - 9.3	SM	29	19	14	25	NP	NP
9.33 - 9.5	SM	28	2	2	39	NP	NP
9.5 - 10.75	ML	92	2	2	62	50	19
10.75 - 11.9	SM	34	10	8	43	NP	NP
11.9 - 13	ML	77	14	11	53	49	18
13 - 14.5	ML	51	14	11	46	NP	NP
14.5 - 14.9	SP - SM	9	8	6	25	NP	NP
14.9 - 16	SC	50	4	3	49	49	23
16 - 33.35	-	-	-	-	-	-	-
33.35 - 34.13	SM	24	46	35	40	NP	NP
34.12 - 37.2	ML	61	>50	47	35	NP	NP
37.2 - 41.6	SM	17	>50	>50	24	NP	NP

Tabla 2: Resumen de la perforación SPT S-12

SONDEO SPT P-11							
PROF (M)	SUCS	FC (%)	N	N(60)	W	LL %	IP %
0 - 1.5	RELLENO	-	-	-	-	-	-
1.5 - 4	MH	99	-	-	87	100	54
4 - 6	CH	68	-	-	88	98	61
6 - 7	SC	36	3	2	55	55	26
7 - 8	SP-SM	8	17	12	33	NP	NP
8 - 9.1	SP-SM	7	4	3	36	NP	NP
9.1 - 10	MH	75	2	1	73	72	34
10 - 11.5	MH	92	-	-	67	56	23
11.5 - 13	CH	73	7	5	59	52	26
13 - 15	SM	29	8	6	45	NP	NP
15 - 19	MH	96	6	4	99	129	63
19 - 20.5	MH	90	-	-	46	74	39
20.5 - 22	CH	96	12	9	49	90	52
22 - 26.5	MH	95	21	16	49	65	27
26.5 - 30	ML	77	32	24	39	42	13
30 - 40	SM	19	>50	>50	28	NP	NP

Tabla 3: Resumen de la perforación SPT P-11

Los valores de N se deben corregir por energía (N_{60}) y por confinamiento ($N_{1(60)}$). La empresa NYLIC en los resúmenes de ensayos ya presentan valores corregidos por energía N_{60} y la corrección por confinamiento se mostrará más adelante y solo se la realizará para los estratos susceptibles a licuación determinados en la sección 6.1.1.

La corrección por energía se la obtiene de la ecuación recomendada por Idriss y Boulanger (2008) que es la siguiente:

$$N_{60} = C_E * C_B * C_R * C_S * N_m \quad (19)$$

En donde N_m es el número de golpes medido en campo, C_E es la corrección por la relación de energía, C_B es la corrección por el diámetro de la perforación, C_R es la corrección por longitud de maniobra y C_S es una corrección para un muestreador que tiene espacio para revestimientos, pero se lo usa sin eso. En muchos casos se utiliza solo el factor C_E que es la corrección más importante. Los valores de estos factores o las ecuaciones para determinarlas se muestran en la tabla 4 propuesta por Idriss y Boulanger (2008).

Factor	Description										
Energy ratio	<p>Energy measurements are required to determine the delivered energy ratios or to calibrate the specific equipment being used. The correction factor is then computed as</p> $C_E = \frac{ER_m}{60}$ <p>where ER_m is the measured energy ratio as a percentage of the theoretical maximum.</p> <p>Empirical estimates of C_E (for rod lengths of 10 m or more) involve considerable uncertainty, as reflected by the following ranges:</p> <table> <tr> <td>Doughnut hammer</td> <td>$C_E = 0.5-1.0$</td> </tr> <tr> <td>Safety hammer</td> <td>$C_E = 0.7-1.2$</td> </tr> <tr> <td>Automatic triphammer</td> <td>$C_E = 0.8-1.3$</td> </tr> </table> <p>(Seed et al. 1984, Skempton 1986, NCEER 1997)</p>	Doughnut hammer	$C_E = 0.5-1.0$	Safety hammer	$C_E = 0.7-1.2$	Automatic triphammer	$C_E = 0.8-1.3$				
Doughnut hammer	$C_E = 0.5-1.0$										
Safety hammer	$C_E = 0.7-1.2$										
Automatic triphammer	$C_E = 0.8-1.3$										
Borehole diameter	<table> <tr> <td>Borehole diameter of 65–115 mm</td> <td>$C_B = 1.0$</td> </tr> <tr> <td>Borehole diameter of 150 mm</td> <td>$C_B = 1.05$</td> </tr> <tr> <td>Borehole diameter of 200 mm</td> <td>$C_B = 1.15$</td> </tr> </table> <p>(Skempton 1986)</p>	Borehole diameter of 65–115 mm	$C_B = 1.0$	Borehole diameter of 150 mm	$C_B = 1.05$	Borehole diameter of 200 mm	$C_B = 1.15$				
Borehole diameter of 65–115 mm	$C_B = 1.0$										
Borehole diameter of 150 mm	$C_B = 1.05$										
Borehole diameter of 200 mm	$C_B = 1.15$										
Rod length	<p>Where the ER_m is based on rod lengths of 10 m or more, the ER delivered with shorter rod lengths may be smaller. Recommended values from Youd et al. (2001) are as follows:</p> <table> <tr> <td>Rod length < 3 m</td> <td>$C_R = 0.75$</td> </tr> <tr> <td>Rod length 3–4 m</td> <td>$C_R = 0.80$</td> </tr> <tr> <td>Rod length 4–6 m</td> <td>$C_R = 0.85$</td> </tr> <tr> <td>Rod length 6–10 m</td> <td>$C_R = 0.95$</td> </tr> <tr> <td>Rod length 10–30 m</td> <td>$C_R = 1.00$</td> </tr> </table>	Rod length < 3 m	$C_R = 0.75$	Rod length 3–4 m	$C_R = 0.80$	Rod length 4–6 m	$C_R = 0.85$	Rod length 6–10 m	$C_R = 0.95$	Rod length 10–30 m	$C_R = 1.00$
Rod length < 3 m	$C_R = 0.75$										
Rod length 3–4 m	$C_R = 0.80$										
Rod length 4–6 m	$C_R = 0.85$										
Rod length 6–10 m	$C_R = 0.95$										
Rod length 10–30 m	$C_R = 1.00$										
Sampler	<p>Standard split spoon without room for liners (the inside diameter is a constant $1\frac{3}{8}$ in.), $C_S = 1.0$.</p> <p>Split-spoon sampler with room for liners but with the liners absent (this increases the inside diameter to $1\frac{1}{2}$ in. behind the driving shoe):</p> $C_S = 1.1 \quad \text{for} \quad (N_1)_{60} \leq 10$ $C_S = 1 + \frac{(N_1)_{60}}{100} \quad \text{for} \quad 10 \leq (N_1)_{60} \leq 30$ $C_S = 1.3 \quad \text{for} \quad (N_1)_{60} \geq 30$ <p>(from Seed et al. 1984, equation by Seed et al. 2001)</p>										

Tabla 4: Factores de corrección para valores de SPT N (Idriss & Boulanger, 2008)

La ecuación utilizada para calcular el valor de $N_{1(60)}$ será:

$$N_{1(60)} = C_N * N_{60} \quad (20)$$

Donde C_N es el factor de corrección por confinamiento. La ecuación para hallar C_N utilizada en este trabajo es la propuesta en la monografía "Soil Liquefaction During Earthquakes" del EERI (Idriss & Boulanger, 2008) y es la siguiente:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^m \leq 1.7 \quad (21)$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{N_{1(60)}} \quad (22)$$

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^{0.784 - 0.0768\sqrt{N_{1(60)}}} \leq 1.7 \quad (23)$$

Para encontrar el valor de $N_{1(60)}$ es necesario realizar iteraciones debido a que el valor de C_N depende de $N_{1(60)}$ esto se lo puede realizar de una manera más sencilla con los softwares existentes actualmente, pero en caso de necesitar el valor de C_N con mayor rapidez o facilidad se puede aplicar la ecuación propuesta por Liao y Whitman (1986):

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^{0.5} \leq 1.7 \quad (24)$$

El valor de $N_{1(60)}$ le falta ser corregido por contenido de finos, pero esto se lo explicará en la sección 6.2.1. del presente trabajo.

5.1.2. Propiedades de los ensayos CPT

Para los ensayos de penetración de cono (CPT) los parámetros básicos para identificar un estrato susceptible a licuación y realizar el análisis del potencial de licuación de los estratos susceptibles son: La resistencia en la punta del cono (q_c), la fricción lateral local (f_s), la presión de poros (u) y el índice de comportamiento (I_c). En las tablas 5 y 6 se muestra un resumen de las perforaciones CPT 1 y CPT 3 con estos parámetros.

La diferencia y ventaja entre el CPT y el SPT en el análisis de licuación es que puede analizar el suelo de manera continua por lo que los promedios que se ven en las tablas no son necesarios al momento de realizar el cálculo si es que se utilizan softwares o se programa una hoja de Excel. Estos parámetros promedios son buenos para poder caracterizar el suelo, idealizarlo y compararlo con perforaciones SPT y perfiles Vs. También se usaron los I_c promedios para evaluar la relación IC vs FC característico del sitio como se detalla en la sub sección 6.1.2. de este trabajo.

CPT - 1				
Prof (m)	qc prom (Mpa)	fs prom (Kpa)	u prom (Kpa)	lc prom
0 - 3	-	-	-	-
3 - 8	0.90	30.05	11.30	3.12
8 - 9.5	4.80	48.56	22.32	2.16
9.5 - 12.25	1.58	39.98	25.69	3.00
12.25 - 15	3.64	48.87	29.85	2.50
15 - 24	2.29	122.24	275.74	3.18
24 - 26	19.64	375.83	81.53	2.08
26 - 28	4.63	206.70	346.76	2.97
28 - 29	12.48	215.11	199.83	2.31
29 - 37	4.89	236.28	610.97	3.10

Tabla 5: Parámetros físicos promedios de la perforación CPT1

CPT - 3				
Prof (m)	qc prom (Mpa)	fs prom (Kpa)	u prom (Kpa)	lc prom
0 - 3	-	-	-	-
3 - 7.5	0.97	30.55	51.31	3.09
7.5 - 9.5	4.69	48.42	50.21	2.21
9.5 - 13	1.29	38.50	92.75	3.13
13 - 14	5.63	67.25	64.00	2.31
14 - 14.5	2.27	56.12	66.09	2.85
14.5 - 15.2	4.24	57.91	69.63	2.45
15.2 - 27	1.82	96.57	484.65	3.32
27 - 29.25	6.96	433.44	1505.00	2.89

Tabla 6: Parámetros físicos promedios de la perforación CPT1

Para realizar el análisis del potencial de Licuación se necesita corregir el q_c por confinamiento (q_{c1}), para este trabajo se utilizará la metodología que aparece en (Boulanger & Idriss, 2014):

$$q_{c1} = C_N * q_c \quad (25)$$

Y el valor de C_N se lo obtiene de la misma manera que el procedimiento para SPT utilizando la ecuación (21), pero el valor del exponente m es distinto y se lo obtiene con la siguiente expresión:

$$m = 1.338 - 0.249(q_{c1})^{0.264} \quad (26)$$

Por lo tanto, la expresión para encontrar C_N es la siguiente:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^{1.338 - 0.249(q_{c1})^{0.264}} \leq 1.7 \quad (27)$$

Al valor de q_{c1} todavía le falta ser corregido por contenido de finos, pero eso se explicará en la sección 6.2.2. del presente trabajo.

5.1.3. Propiedades del perfil Vs

Las propiedades necesarias para evaluar el potencial de licuación para un perfil de velocidades de ondas de corte superficiales (V_s) son: la velocidad (V_s), Contenido de Finos (FC) y el esfuerzo vertical efectivo (σ'_{vc}). En la tabla 7 se muestra el perfil V_s del sitio con sus propiedades. Los valores de peso específico son utilizados para calcular el esfuerzo efectivo inicial.

PERFIL Vs			
Depth (m)	Vs (m/s)	FC %	Peso Esp. (KN/m3)
2	270	-	17.2
2.5	150	99	14.5
7	92	65	16.25
7.5	132	23	17.5
9.5	132	21	17.75
10.5	132	92	16
11.5	132	34	17.4
13	132	64	16.8
14.5	132	19	18.2
19.5	110	98	17
23.5	330	90	16.85
30.5	250	88	19.25
40.5	320	19	20.5
50	420	-	20

Tabla 7: Perfil Vs del sitio con sus propiedades físicas

Estas propiedades como la de contenido de finos y peso específico se las obtuvo gracias a las perforaciones del proyecto, haciendo promedios entre las perforaciones S-12 y P-11 o eligiendo los parámetros de una perforación antes que la de otra por criterio del autor.

Los valores de V_s , así como en el caso de (N) y q_c se deben corregir por confinamiento (V_{s1}). Kayen et al. (2013) recomienda utilizar la siguiente expresión:

$$V_{s1} = V_s * C_{Vs} = V_s * \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vc}} \right)^{0.25} \quad (28)$$

5.2. PERFIL GEOTÉCNICO

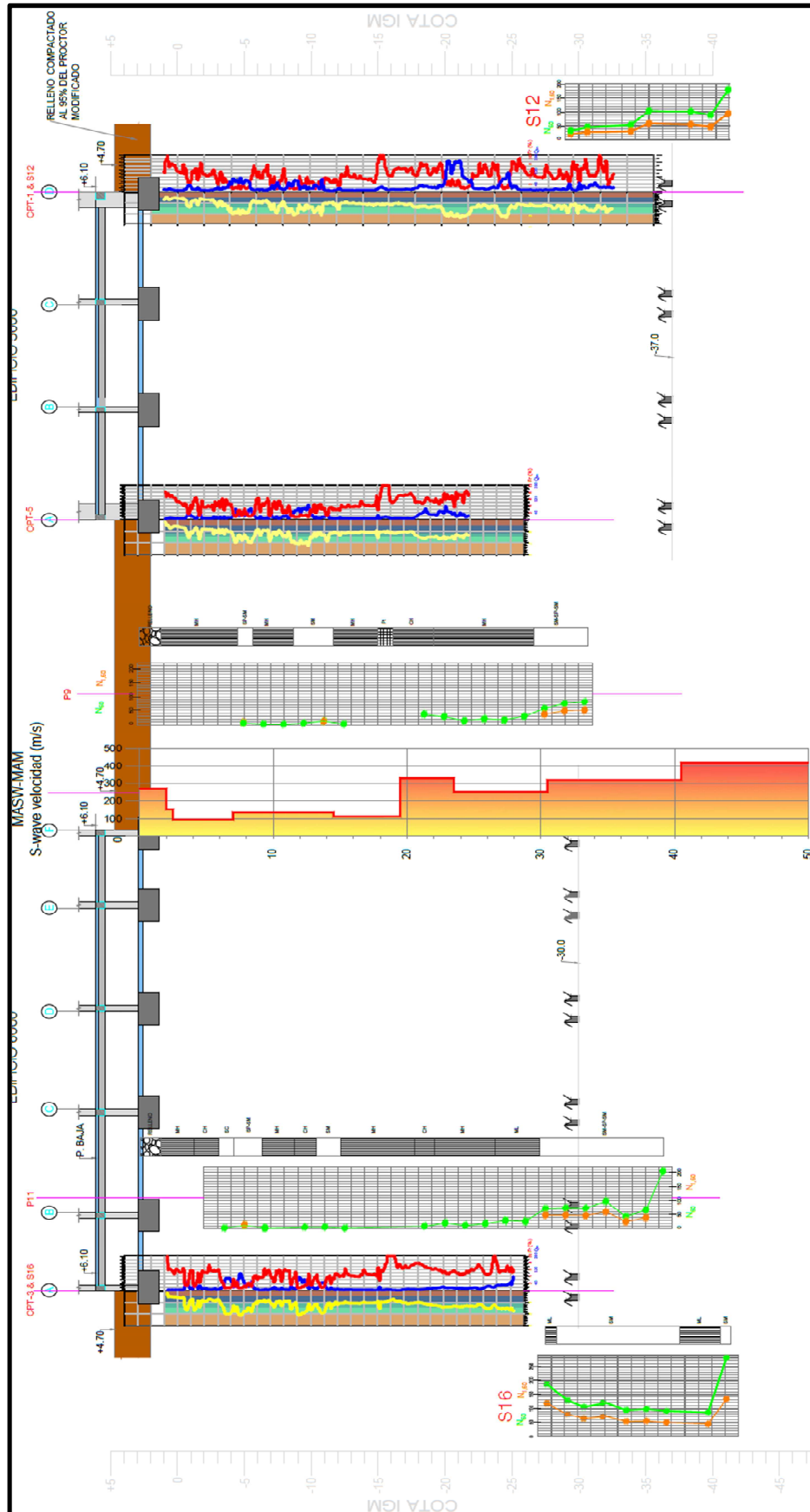


FIGURA 22: Perfil Geotécnico del proyecto

6. ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

En este capítulo se explicarán el proceso y los resultados para el análisis del potencial de licuación para los 3 tipos ensayos nombrados anteriormente (SPT, CPT y Vs).

Para tener una correcta comparación entre estos métodos se ha decidido realizar el análisis con los mismos parámetros sísmicos. La magnitud de momento (M_w) utilizada para evaluar el potencial de licuación y realizar la comparación es de 7, así mismo, la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno será de 0.4g debido a la ubicación del proyecto en el mapa de riesgo sísmico de la NEC-SE-DS – 15 mencionado en el capítulo 2.2.

6.1. SUSCEPTIBILIDAD

6.1.1. Criterios de composición (SPT).

Para el presente trabajo se utilizaron 2 de las metodologías más aceptadas actualmente (Bray & Sancio, 2006) y (Boulanger & Idriss, 2006) que fueron explicadas en el capítulo 4.3. Para el proyecto se caracterizará como susceptible a licuación cualquier estrato que cumpla con el criterio de susceptibles para cualquiera de los dos o ambos métodos.

Por conveniencia no se evaluaron todos los estratos, solo los que al criterio del autor podrían sufrir licuación (Suelos arenosos y limos o arcillas de baja plasticidad). A continuación, se muestran los estratos escogidos para ambas perforaciones (SPT 12 y SPT 11) con sus respectivas propiedades mecánicas.

SONDEO	PROF	SUCS	FC (%)	W	LL	IP	w/LL	
S-12	5.5	SC	32	42	53	32	0.79	NO
S12	7	SC	44	57	45	22	1.27	NO
S-12	7.5	SM	23	41	0	0	1.40	
S-12	8	SP - SM	8	32	0	0	1.40	
S-12	8.5	SM	16	31	0	0	1.40	
S-12	9	SM	29	25	0	0	1.40	
S-12	9.4	SM	28	39	0	0	1.40	
S-12	10.15	ML	92	62	50	19	1.24	NO
S-12	11.35	SM	34	43	0	0	1.40	
S-12	12.45	ML	77	53	49	18	1.08	TAL VEZ
S-12	13.75	ML	51	46	0	0	1.40	
S-12	14.7	SP - SM	9	25	0	0	1.40	
S-12	15	SC	50	49	49	23	1.00	NO

Tabla 8: Propiedades físicas de los estratos de los primeros 15 metros de la perforación SPT 12.

SONDEO	PROF	SUCS	FC (%)	W	LL	IP	w/LL	
P-11	6	SC	36	55	55	26	1.00	NO
P-11	7.75	SP-SM	8	33	0	0	1.40	
P-11	8.8	SP-SM	7	36	0	0	1.40	
P-11	9.5	MH	75	73	72	34	1.01	NO
P-11	10.5	MH	92	67	56	23	1.20	NO
P-11	12	CH	73	59	52	26	1.13	NO
P-11	14	SM	29	45	0	0	1.40	
P-11	30.5	SM	17	27	0	0	1.40	
P-11	32	SM	20	26	0	0	1.40	
P-11	33.5	SM	13	24	0	0	1.40	
P-11	35	SP-SM	10	20	0	0	1.40	
P-11	36.5	SP - SM	26	40	0	0	1.40	
P-11	38.5	SM	26	31	0	0	1.40	

Tabla 9: Propiedades físicas de los estratos de la perforación SPT 11.

▪ **Criterio de Susceptibilidad de Bray y Sancio (2006).**

Este criterio depende de los criterios W_c/LL e IP para evaluar la susceptibilidad como se explica en el capítulo 4.3.1. A continuación se mostrarán los resultados de la evaluación de Susceptibilidad utilizando este método para las perforaciones SPT 12 y SPT 11.

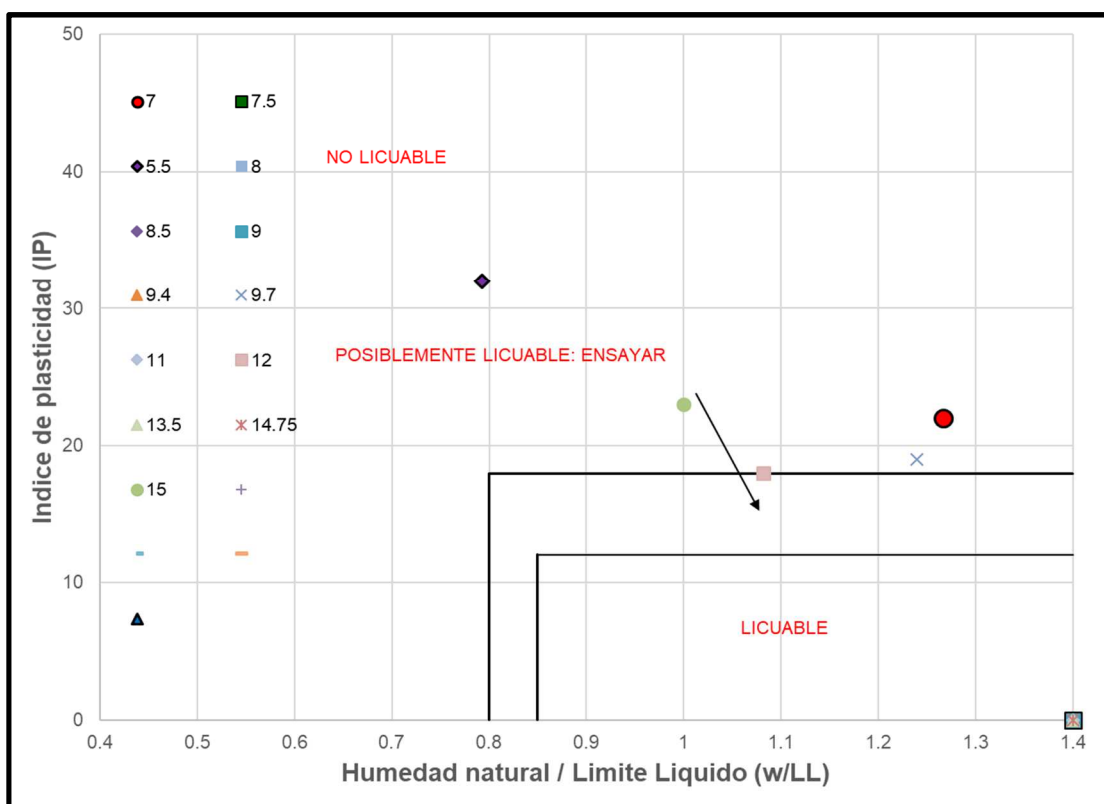


FIGURA 23: Análisis de la Susceptibilidad de los estratos de la perforación SPT 12 utilizando (Bray & Sancio, 2006).

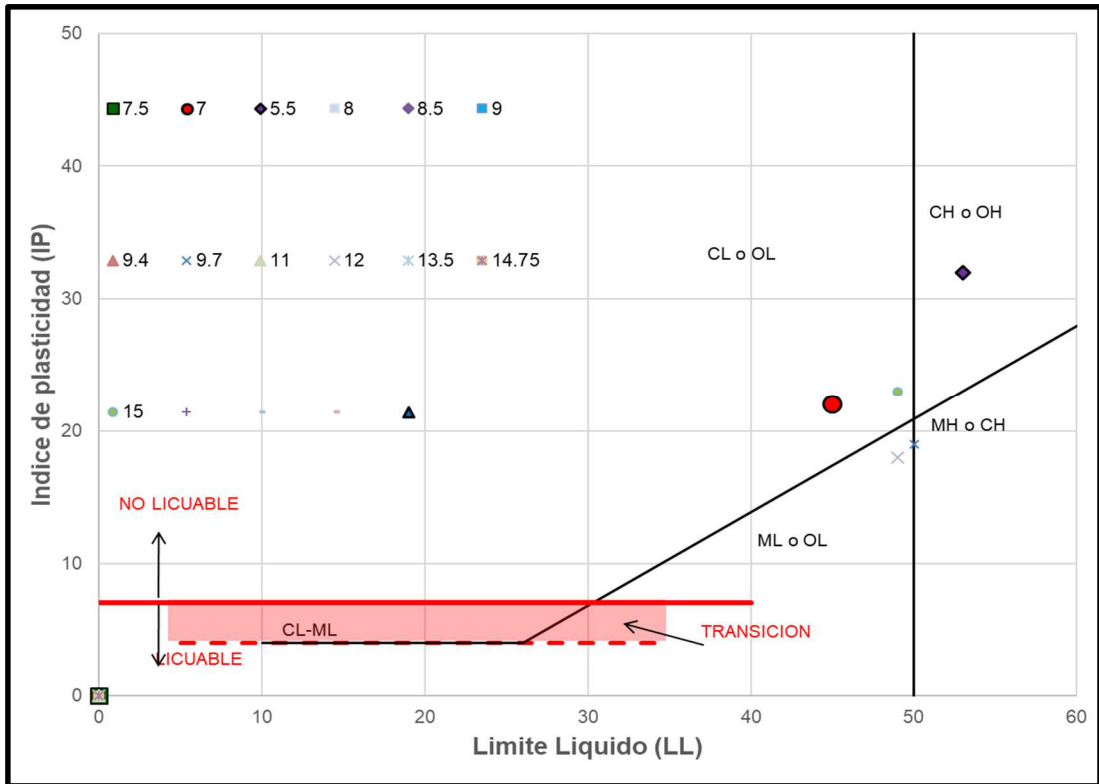


FIGURA 25: Análisis de la Susceptibilidad de los estratos de la perforación SPT 12 utilizando (Boulanger & Idriss, 2006).

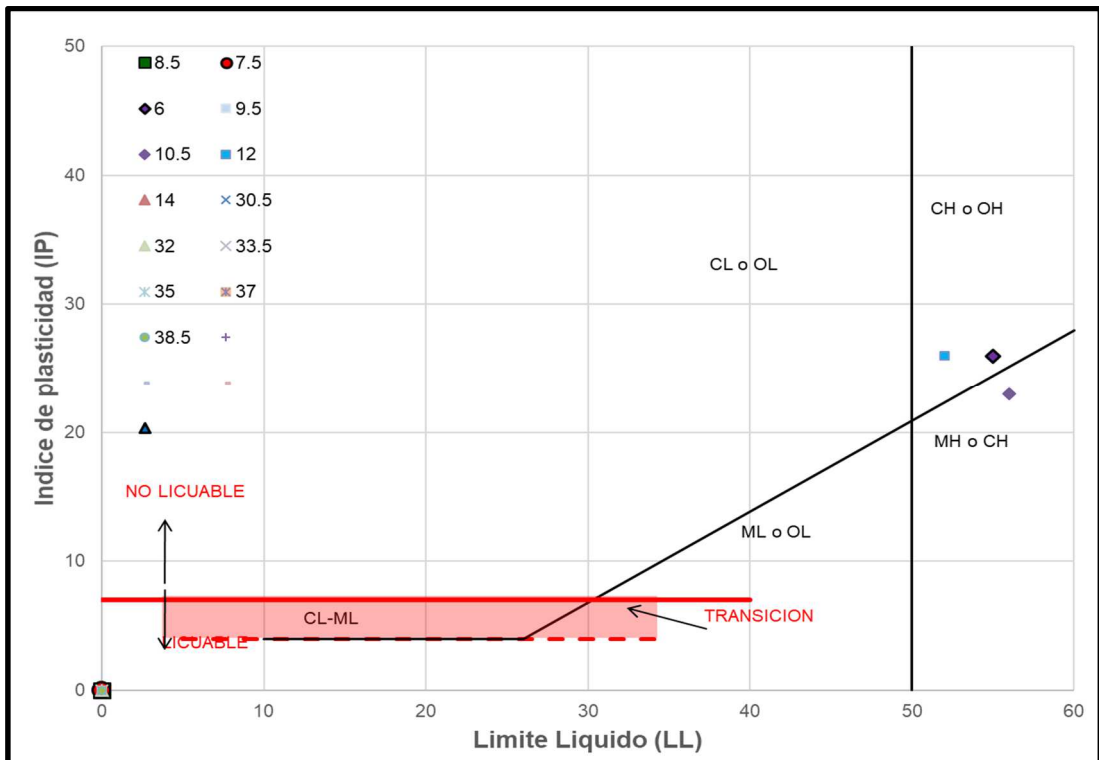


FIGURA 26: Análisis de la Susceptibilidad de los estratos de la perforación SPT 12 utilizando (Boulanger & Idriss, 2006).

En las tablas 8 y 9 se puede ver que el autor señaló los estratos que no son susceptibles a licuación (color amarillo) y los que son probablemente licuables (color naranja). Todos los estratos sin color son considerados susceptibles a sufrir licuación y con aquellos se procederá a realizar los análisis de potencial de licuación con la metodología descrita en la sección 6.2.1. Los estratos que se encuentran a una profundidad mayor a 30 metros (SPT P-11) cumplen los criterios de ambos autores para ser considerados susceptibles, pero las metodologías de análisis de licuación concuerdan que los análisis deberían ser hasta una profundidad máxima de 20 metros.

6.1.2. Criterio de I_c y correlación I_c vs FC usando datos de CPT

Como se explicó en la sección 4.3.3. el valor de I_c que separa el comportamiento de un suelo granular al comportamiento de una arcilla es $I_c=2.6$ (Robertson & Wride, 1998) pero dependiendo del sitio los análisis de licuación para la metodología CPT se puede realizar el análisis con $2.4 \leq I_c \leq 2.8$ para tener seguridad y sensibilidad sobre este parámetro (Boulanger & Idriss, 2014).

Boulanger e Idriss en su trabajo “CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures” (2014) recomiendan realizar correlaciones de I_c vs FC y encontrar el valor de C_{FC} para el sitio de análisis y si es posible debido a que las relaciones propuestas por ellos no son muy confiables debido a la dispersión de los datos de las figuras 17 y 18. Debido a la cantidad de perforaciones SPT y CPT realizadas para el sitio de estudio fue posible realizar estas correlaciones.

Las perforaciones (SPT) utilizadas para realizar estas correlaciones fueron las S-12, P-10, P-9 y P-7; y las perforaciones (CPT) utilizadas para el mismo fin fueron CPT-1, CPT-5, CPT-6 y CPT-4. El procedimiento para realizar estas correlaciones fue de tratar de escoger las perforaciones (SPT y CPT) que estén más cerca y comparar sus estratos, para las perforaciones que tenían una separación entre sí se elaboró un perfil referenciando cotas para poder ubicar estratos similares (Solo las perforaciones S-12 y CPT-1 se encontraban en el mismo lugar) y con esto equiparar los valores de I_c (realizando un promedio entre los rangos escogidos) con FC . Esto se lo realizó para los primeros 15 metros de cada perforación. Debido a que el CPT es una perforación continua en ocasiones no se tomaban en cuenta lentes de otro material para el promedio del valor de I_c si es que no se encontraba ese mismo lente en las perforaciones SPT.

Una vez obtenido una tabla de valores de I_c y FC para distintas profundidades y distintas perforaciones se procedió a realizar una gráfica de dispersión (FIGURA 27). También se grafican las curvas presentadas por Boulanger e Idriss (2014) de $C_{FC}=0$, $C_{FC}=0.29$ Y $C_{FC}=-0.29$. De estos puntos se realiza una línea de tendencia que más se ajuste a los puntos graficados. Para el método de Boulanger e Idriss (2014) se debe hallar el valor característico C_{FC} , debido a que la ecuación de la línea de tendencia posee una pendiente distinta a la

de la propuesta por Boulanger e Idriss fue necesario realizar un ajuste de la curva probando valores de C_{FC} hasta encontrar uno que con la misma pendiente obtenga el valor de R^2 más parecido al de la línea de tendencia. La pendiente de la ecuación (12) (Boulanger & Idriss, 2014) es $1/80$ que en decimales es igual a 0.0125.

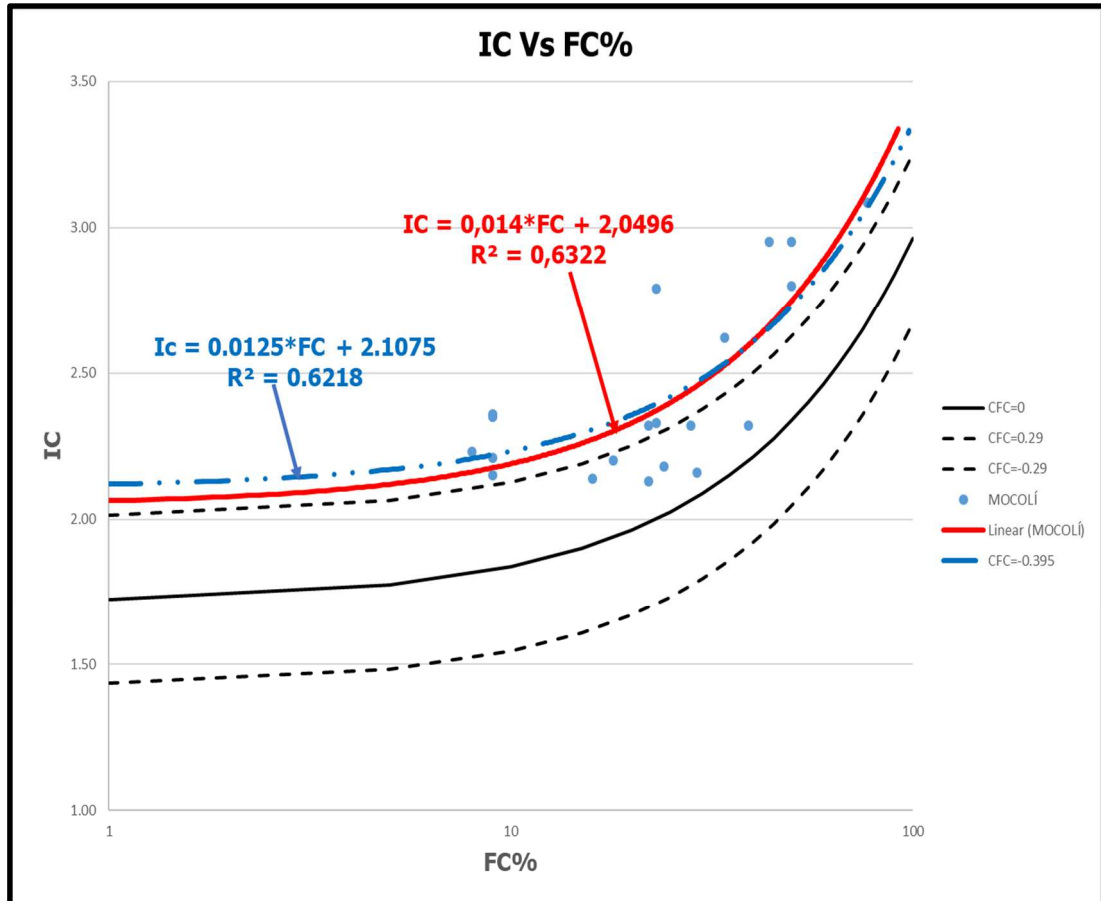


FIGURA 27: Datos I_c vs FC del proyecto, correlaciones de Boulanger e Idriss (2014) y curva característica del sitio.

Como se puede ver en la FIGURA 27 la línea de tendencia que más se ajusta para el sitio de del proyecto está por encima del límite superior de la correlación propuesta por Boulanger e Idriss (2014) y el C_{FC} característico del sitio es de -0.395 .

En la FIGURA 28 se muestran los datos del sitio y los datos presentados en la FIGURA 18 realizados por Suzuki et. Al. (1998) y Boulanger & Idriss, también se muestran la línea de tendencia más ajustada y la correlación para $C_{FC}=-0.395$. Se pudieron graficar estos puntos gracias a software GRAPHER de la compañía Golden Software, para esto se necesitaba importar al programa la FIGURA 18 extraída de Boulanger e Idriss (2014), ubicar los ejes Y y X (en escala logarítmica) en la figura y luego empezar a seleccionar cada punto. Cada vez que se seleccionaba un punto se guardaban en una hoja de cálculo que al final se podía importar a Excel. Para este proyecto se utilizará $I_c=2.7$ como límite de comportamiento como arcilla.

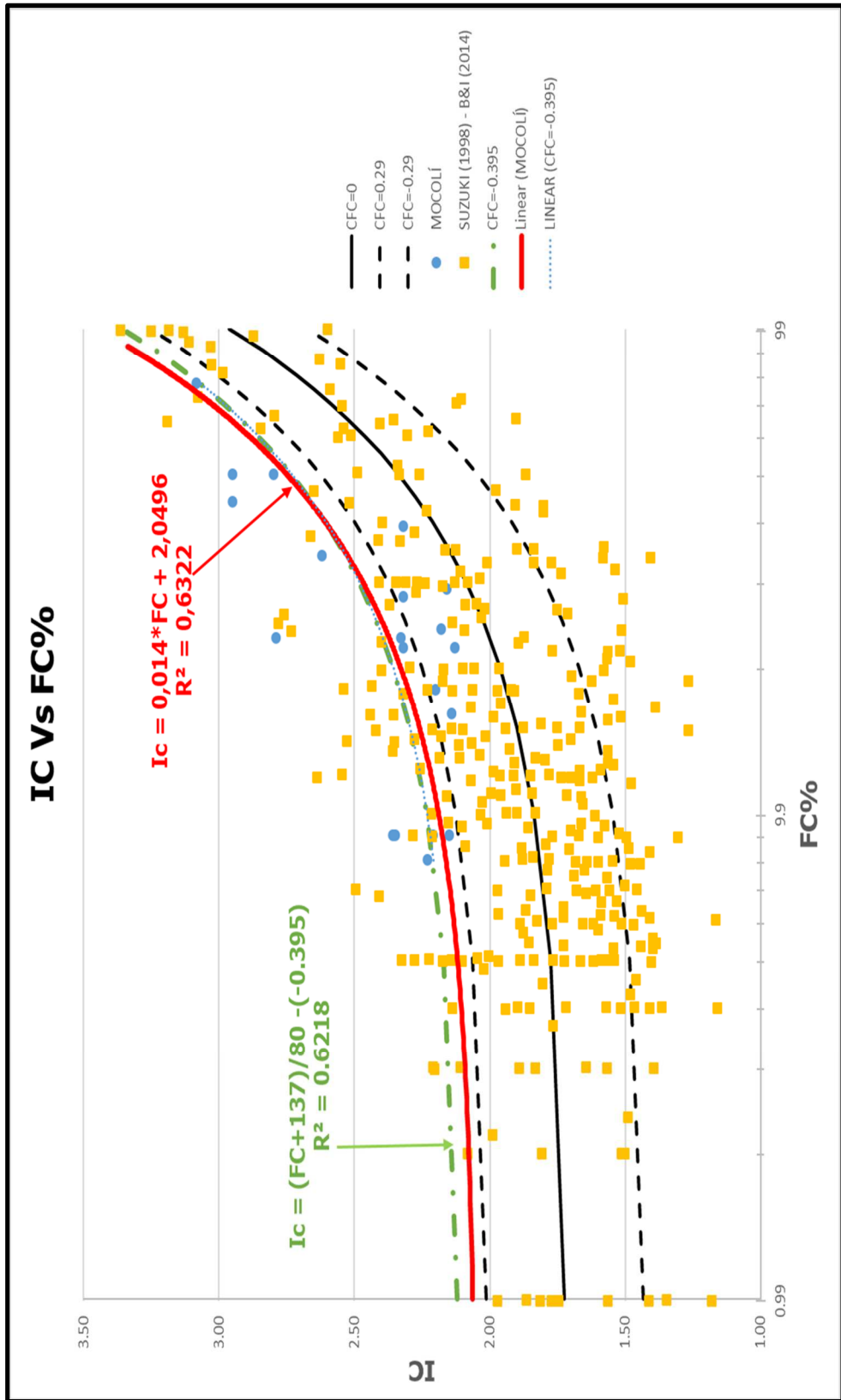


FIGURA 28: Correlación de I_c Vs $FC\%$ para el sitio del proyecto con $CFC=-0.395$, los datos del proyecto y los recopilados por (Boulanger & Idriss, 2014) y Suzuki et. Al. (1998) utilizando el software GRAPHER.

6.2. ANÁLISIS DETERMINISTICO DE LA LICUACIÓN

El objetivo del análisis de licuación en este proyecto para los 3 métodos (SPT, CPT y Vs) es el de conocer los valores del factor de seguridad (FS), el índice del potencial de licuación y los asentamientos verticales causados por la licuación (V. Set. Liq).

El factor (FS) de seguridad se lo obtiene como se muestra en la sección 4.2. dividiendo el valor de la relación de resistencia cíclica de un estrato (CRR) para la relación de esfuerzos cíclicos inducidos por un sismo (CSR) como se muestra en la ecuación (6). Cada metodología tendrá sus ecuaciones para determinar el valor del CRR pero estos valores siempre están en función de una magnitud de momento Mw. de 7.5 y un esfuerzo efectivo de confinamiento de 1 atm ($CRR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}}$)

Para encontrar los valores de CRR para cualquier magnitud de momento y esfuerzo efectivo de confinamiento se utilizará la siguiente expresión (Idriss & Boulanger, 2008):

$$CRR_{M,\sigma'_{vc}} = CRR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}} * MSF * K_{\sigma} \quad (29)$$

Donde MSF es el factor de escala de magnitud y para las metodologías de CPT y SPT se la obtiene de acuerdo a lo propuesto por Boulanger e Idriss (2014),

$$MSF = 1 + (MSF_{MAX} - 1) * \left(8.64 * \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right) \quad (30)$$

Los valores de MSF_{MAX} se determinarán según el tipo de metodología.

K_{σ} es el factor de corrección por confinamiento y Boulanger e Idriss (2014) recomiendan utilizar las ecuaciones propuestas por (Idriss & Boulanger, 2008) para determinarlo (Metodologías SPT y CPT),

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} * \ln\left(\frac{\sigma'_{vc}}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (31)$$

El coeficiente C_{σ} está expresado en resistencia de penetración corregida por confinamiento y contenido de finos para SPT y CPT y estarán indicados más adelante en las secciones 6.2.1 (SPT) y 6.2.2. (CPT).

El índice del potencial de licuación (LPI) es parte de los índices de severidad de la licuación y pretende proveer una medida de la severidad de las manifestaciones en la superficie del terreno basado en la respuesta acumulada de la licuación de un perfil de suelo. (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016).

Fue propuesto por (Iwasaki, Tatsuoka, & Yasuda, 1978) y proporciona un índice ponderado con la profundidad del potencial de un sitio para desencadenar licuación (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016). LPI es calculado de la siguiente forma:

$$LPI = \int_0^{20} F * W(z) dz \quad (32)$$

Donde el $F = 1 - (FS)$ cuando $FS \leq 1$ y $F = 0$ cuando $FS > 1$ (FS es el factor de seguridad obtenido del proyecto) y $w(z)$ es una función lineal ponderada de la profundidad dada por $w(z) = 10 - 0.5 * z$ y $w(z) = 0$ cuando $z > 20m$. (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016)

Entonces el índice LPI depende del espesor de los estratos licuables en los primeros 20 metros, la proximidad de estos estratos a la superficie del suelo y cuanto el valor de FS es menor a 1. El valor de LPI abarca de 0 (ningún estrato con FS menor a 1) hasta 100 (cuando el valor de FS es igual a 0 para todos los estratos de los primeros 20 metros). Análisis de datos de 45 sitios que se licuaron en el terremoto de Niigata en Japón muestran que existía licuación severa cuando $LPI > 15$ y muy poca licuación se producía cuando $LPI < 5$ (Iwasaki, Tatsuoka, & Yasuda, 1978). (The National Academies of Science, Engineering, Medicine, 2016)

Los asentamientos verticales producidos por la licuación son un excelente indicador de la severidad ocurrida en la superficie del terreno (V. Set. Liq). El análisis fue propuesto por (Zhang , Robertson, & Brachman, 2002) y son asentamientos producidos por estratos susceptibles a licuación que no necesariamente alcancen $r_u = 100\%$ pero que si hayan perdido resistencia y estén sometidos a altos esfuerzos de corte. La expresión general de los asentamientos verticales fue extraída de (Idriss & Boulanger, 2008) y es la siguiente:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_v * dz \quad (33)$$

Donde ε_v es la deformación volumétrica calculada para cada metodología.

6.2.1. Análisis para SPT - (Boulanger & Idriss, 2014)

Una vez escogidos los estratos susceptibles a licuación en la sección 6.1.1. se procede a realizar el análisis determinístico del potencial de licuación del sitio utilizando las perforaciones S-12 y P-11. El método escogido por el autor para realizar el análisis será el propuesto por Boulanger e Idriss en su trabajo (CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES, 2014). El análisis se lo realizará con la ayuda del software LiqSVs de la empresa GeoLogismiki, este programa permite realizar análisis de licuación para ensayos SPT y perfiles de Velocidades Vs. El programa permite usar dos metodologías para desarrollar el análisis para las perforaciones SPT (Boulanger & Idriss, 2014) y (NCEER, 1997), pero como se dijo antes se utilizará la metodología de Boulanger e Idriss.

Antes de empezar a explicar cómo funciona este programa se mencionarán criterios básicos del método de Boulanger e Idriss (2014).

Como se explicó en la sección 5.1.1. se necesita hacer una corrección por contenido de finos (FC) al valor de $N_{1(60)}$, un porcentaje mayor de contenido de finos representará un aumento en el valor de número de golpes. Boulanger e Idriss en su trabajo del 2014 recomiendan utilizar la siguiente expresión propuesta por (Idriss & Boulanger, 2008):

$$N_{1(60cs)} = N_{1(60)} + \Delta N_{1(60)} \quad (34)$$

Donde,

$$\Delta N_{1(60)} = \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC + 0.01} - \left(\frac{15.7}{FC + 0.01}\right)^2\right) \quad (35)$$

La variación de $\Delta N_{1(60)}$ con FC calculada con la ecuación (34) se muestra en la FIGURA 29. Se puede notar que la corrección por contenido de finos adquiere una tendencia casi constante para valores de FC mayores a 35% (Idriss & Boulanger, 2008), que es consistente con las observaciones experimentales en el que el comportamiento de arenas limosas con ese valor de FC es gobernado por la matriz de finos (Mitchell & Soga, 2005)

Para encontrar el factor de seguridad a licuación (FS) se necesita conocer los valores de CSR y CRR, los valores de CSR se obtienen de la manera indicada en la sección 4.4.3. Y el valor de CRR para la metodología utilizada en este proyecto (Boulanger & Idriss, 2014) se la determina de la siguiente expresión propuesta por Idriss y Boulanger (2008):

$$CRR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}} = \exp\left(\frac{N_{1(60cs)}}{14.1} + \left(\frac{N_{1(60cs)}}{126}\right)^2 - \left(\frac{N_{1(60cs)}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{N_{1(60cs)}}{25.4}\right)^4\right) \quad (36)$$

El valor de $CRR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}}$ debe ser corregido para distintas magnitudes de momento y valores distintos al esfuerzo de confinamiento de 1 atmosfera de

la manera indicada en literal 6.2. con las ecuaciones (29), (30) y (31). Los valores de MSF_{MAX} y C_σ recomendados por Boulanger e Idriss (2014) son:

$$MSF_{MAX} = 1.09 + \left(\frac{N_{1(60cs)}}{31.5} \right)^2 \leq 2.2 \quad (37)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{N_{1(60cs)}}} \leq 0.3 \quad (38)$$

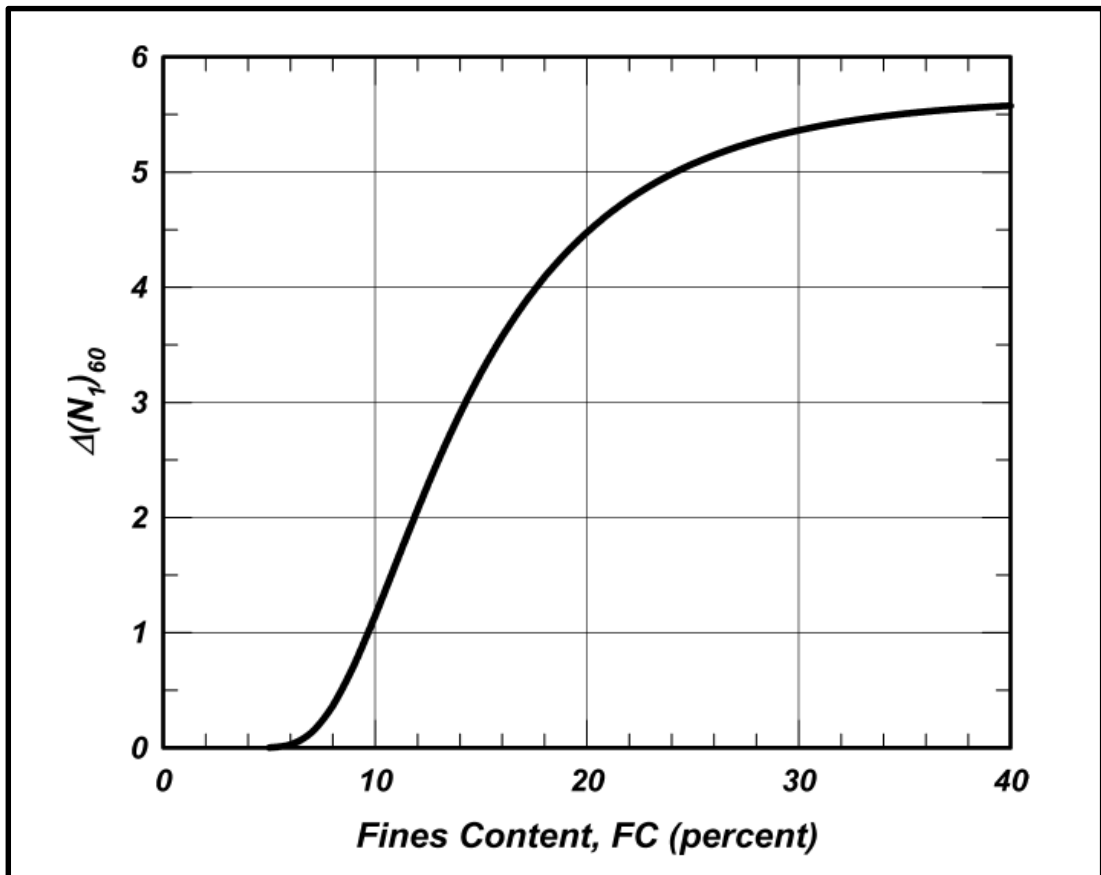


FIGURA 29: Variación del valor de N corregido vs el contenido de finos (Idriss & Boulanger, 2008).

▪ **Análisis del Potencial de Licuación en el Programa LiqSVs**

El programa pide ingresar como datos: profundidad (m), número de golpes (límite 50), Contenido de finos (FC%), D50 (mm), peso específico (KN/m³), Infl. Depth (m), ángulo de fricción (opcional) y permite decidir si un estrato es licuable o no (FIGURAS 30 y 31).

No	Depth (m)	Raw SPT (blows/30 cm)	FC (%)	D50 (mm)	Unit Weight (kN/m³)	Infl. Depth (m)	Friction Angle (°)	Can Liquefy
1	7.50	12	23.00	1.00	17.50	0.500	32	<input checked="" type="checkbox"/>
2	8.00	8	8.00	1.00	18.50	0.500	30	<input checked="" type="checkbox"/>
3	8.50	16	16.00	1.00	18.70	0.500	34	<input checked="" type="checkbox"/>
4	9.00	19	29.00	1.00	19.50	0.500	35	<input checked="" type="checkbox"/>
5	9.40	2	28.00	1.00	17.75	0.200	25	<input checked="" type="checkbox"/>
6	10.15	2	92.00	1.00	16.00	1.300		<input type="checkbox"/>
7	11.35	10	34.00	1.00	17.50	1.100	31	<input checked="" type="checkbox"/>
8	12.45	14	77.00	1.00	16.50	1.100	33	<input checked="" type="checkbox"/>
9	13.75	14	51.00	1.00	17.00	1.500	32	<input checked="" type="checkbox"/>
10	14.70	8	9.00	1.00	19.50	0.400	29	<input checked="" type="checkbox"/>
11	24.00	10	80.00	1.00		2.000		<input type="checkbox"/>
12	33.75	46	24.00	1.00	17.65	0.780	38	<input type="checkbox"/>
13	35.65	50	61.00	1.00	18.20	3.100	35	<input type="checkbox"/>
14	39.40	50	17.00	1.00	19.50	4.400	40	<input type="checkbox"/>
15								<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 30: Datos del perfil SPT S-12 ingresados en el programa LiqSVs de la empresa Geologismiki.

No	Depth (m)	Raw SPT (blows/30 cm)	FC (%)	D50 (mm)	Unit Weight (kN/m³)	Infl. Depth (m)	Friction Angle (°)	Can Liquefy
1	7.75	17	8.00	1.00	18.50	1.500	35	<input checked="" type="checkbox"/>
2	8.80	4	7.00	1.00	18.00	0.600	27	<input checked="" type="checkbox"/>
3	11.50	5	84.00	1.00	15.70	4.000		<input type="checkbox"/>
4	14.00	8	29.00	1.00	17.20	1.850	29	<input checked="" type="checkbox"/>
5	22.25	10	85.00	1.00		14.000		<input type="checkbox"/>
6	30.50	50	17.00	1.00	19.00	1.150	50	<input type="checkbox"/>
7	32.00	50	20.00	1.00	19.50	1.000	50	<input type="checkbox"/>
8	33.50	50	13.00	1.00	19.50	1.000	50	<input type="checkbox"/>
9	35.00	50	10.00	1.00	20.00	1.000	41	<input type="checkbox"/>
10	36.50	50	26.00	1.00	17.50	1.000	49	<input type="checkbox"/>
11	38.50	50	26.00	1.00	18.70	1.000	50	<input type="checkbox"/>
12								<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 31: Datos del perfil SPT P-11 ingresados en el programa LiqSVs de la empresa Geologismiki.

D50: es el tamaño de partícula promedio a la profundidad evaluada, este valor es utilizado para calcular la deformación volumétrica post licuación (No es relevante en el proyecto).

Infl. Depth: es el espesor del estrato a la profundidad evaluada y es utilizada para calcular asentamientos verticales.

Se ingresan también las propiedades de licuación que son: la magnitud de momento (M_w), la aceleración máxima de la superficie del terreno (a_{max}) y el nivel freático del sitio al momento del terremoto. Está la opción de elegir el tipo de metodología de análisis y valores de C_E y longitud de maniobra para la corrección por N_{60} y se puede decidir si el terreno tiene pendiente para que el programa evalúe el desplazamiento lateral por licuación (para este proyecto se asumirá que el terreno es plano).

Los valores corregidos $N_{1(60cs)}$, CRR y CSR son calculados por el programa en las FIGURAS 32 y 33 se muestran los resultados para el análisis con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y nivel freático de 2 metros.

Se realizaron bastantes análisis en el programa con distintos valores de M_w (5 -8), de a_{max} (0.2g – 0.5g) y nivel freático de 2 metros. Se graficaron los resultados de FS, LPI y V. Set. Liq. Los resultados de estos análisis se presentan en las FIGURAS 34-39 para la perforación S-12 y P-11.

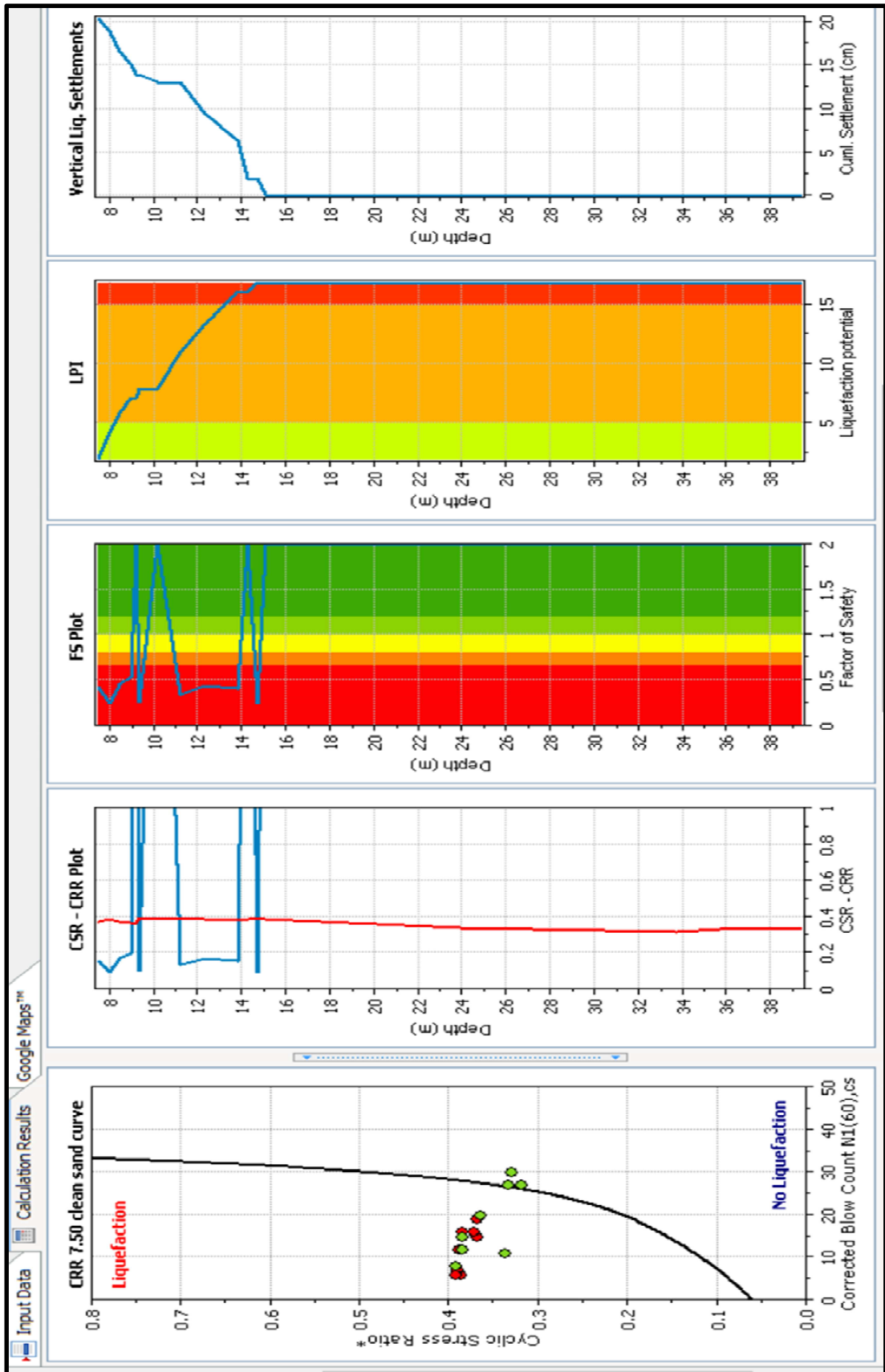


FIGURA 32: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil SPT S-12 con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y $N.F.=2m$, utilizando el programa LiqSVs de Geologismiki. (Boulanger & Idriss, 2014)

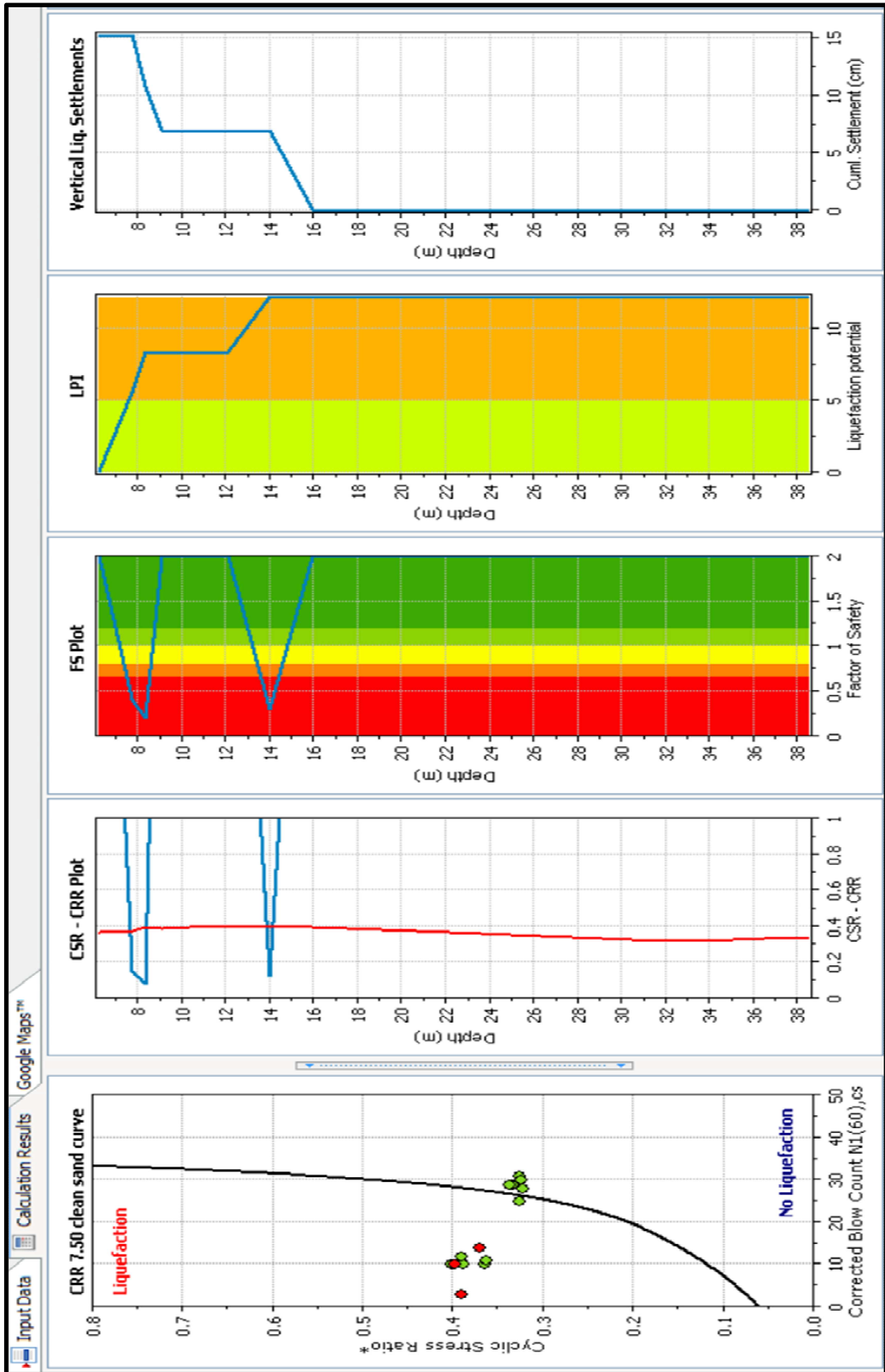


FIGURA 33: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil SPT P-11 con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y $N.F.=2m$, utilizando el programa LiqSVs de Geologismiki. (Boulanger & Idriss, 2014)

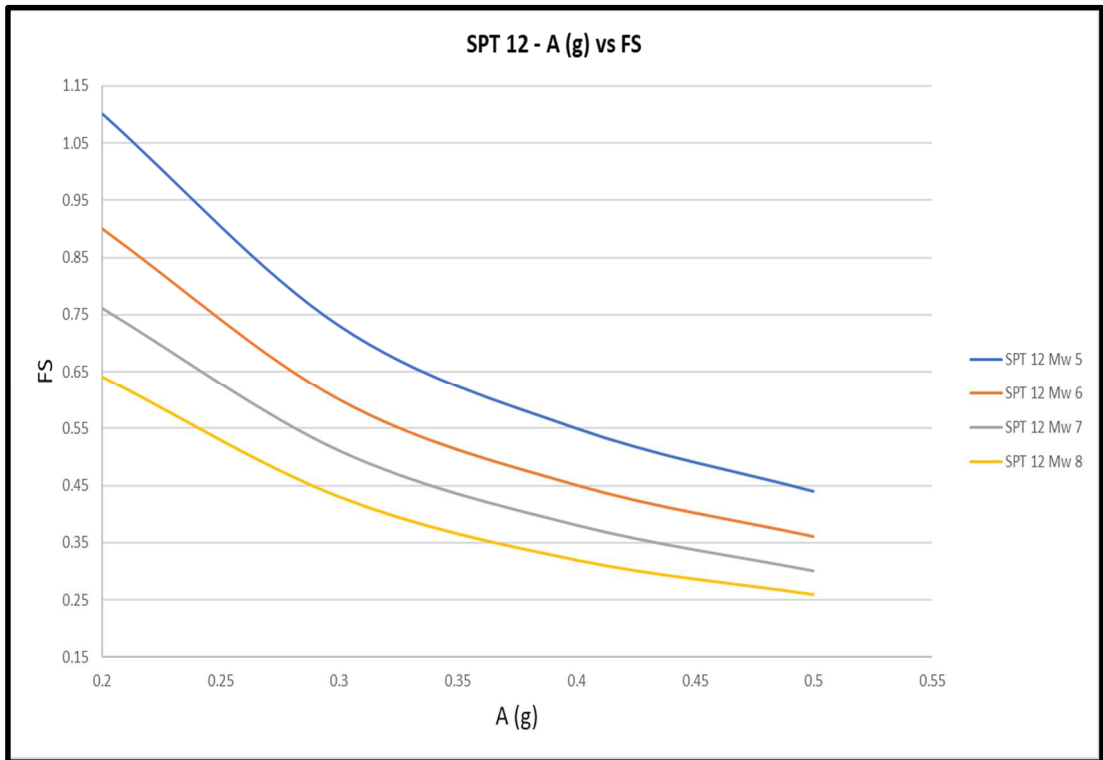


FIGURA 34: Comparación del FS vs a para la perforación SPT S-12 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7.5 – 9.5m). Metodología Boulanger e Idriss (2014)

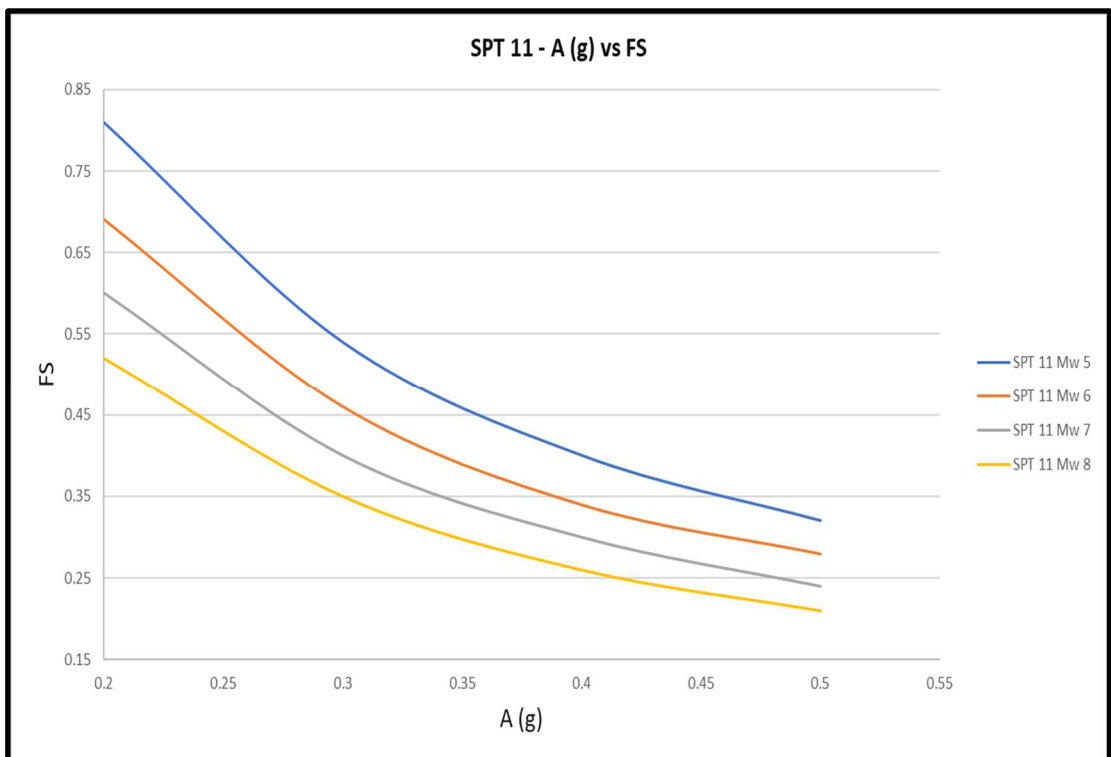


FIGURA 35: Comparación del FS vs a para la perforación SPT P-11 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7.5 – 9.5m). Metodología Boulanger e Idriss (2014)

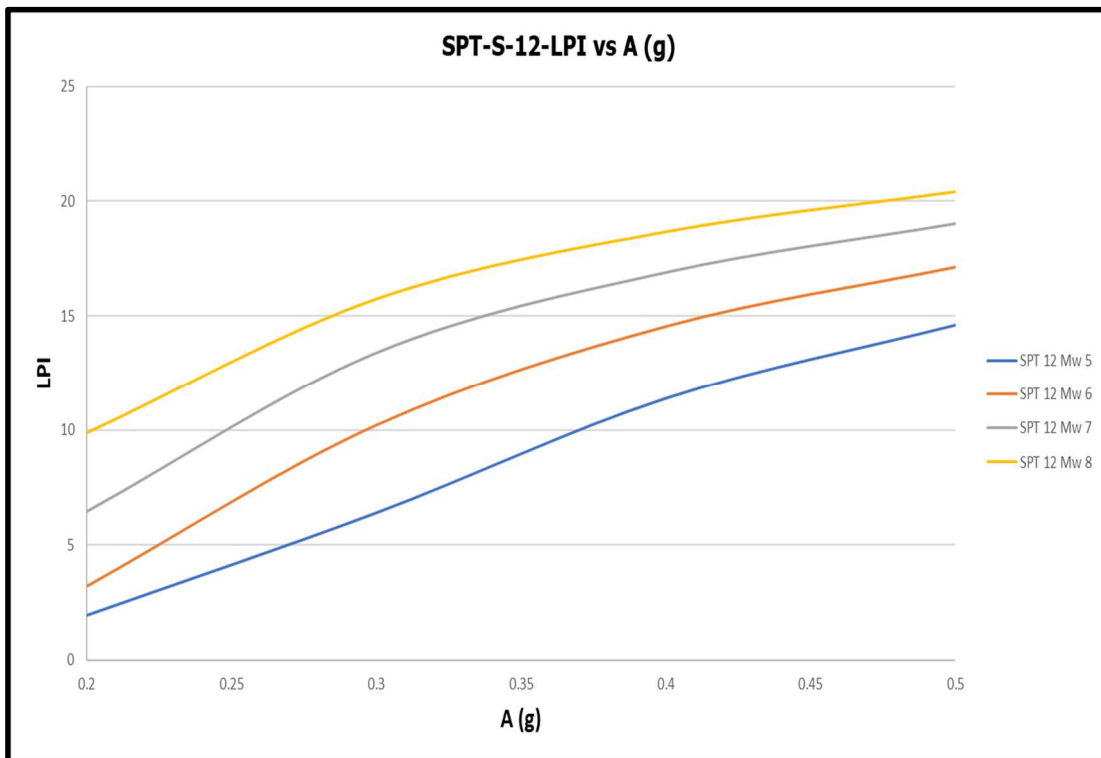


FIGURA 36: Comparación del LPI vs a para la perforación SPT S-12 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

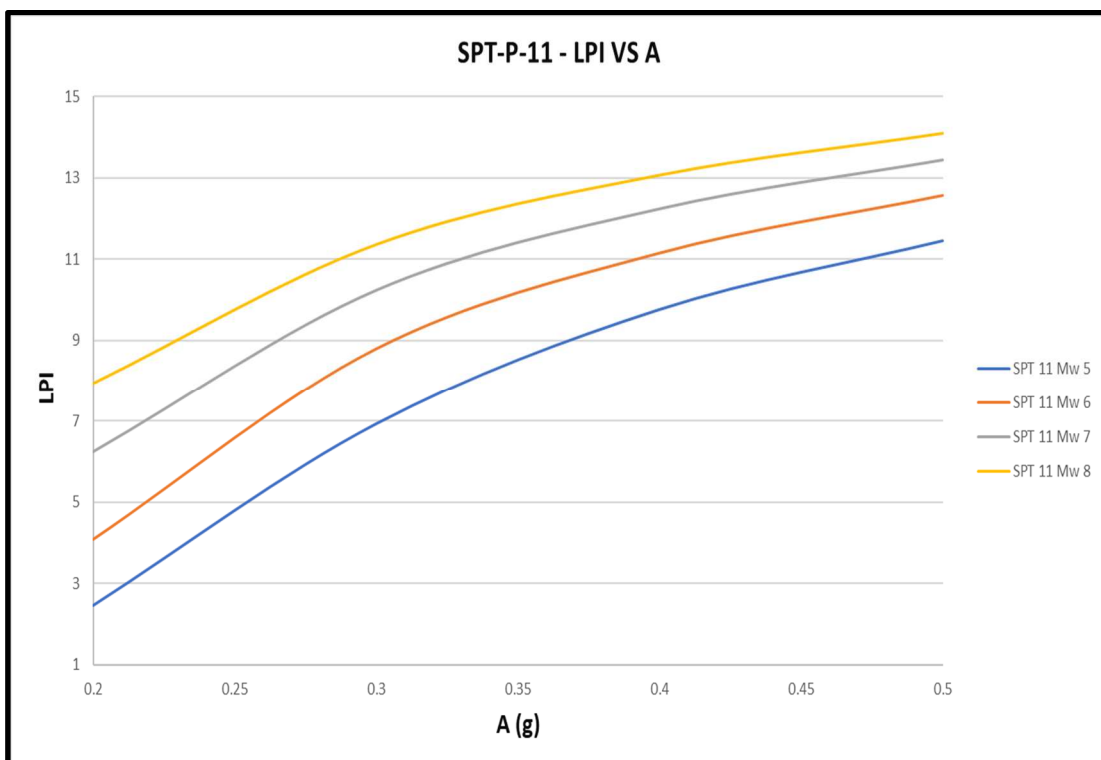


FIGURA 37: Comparación del LPI vs a para la perforación SPT P-11 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

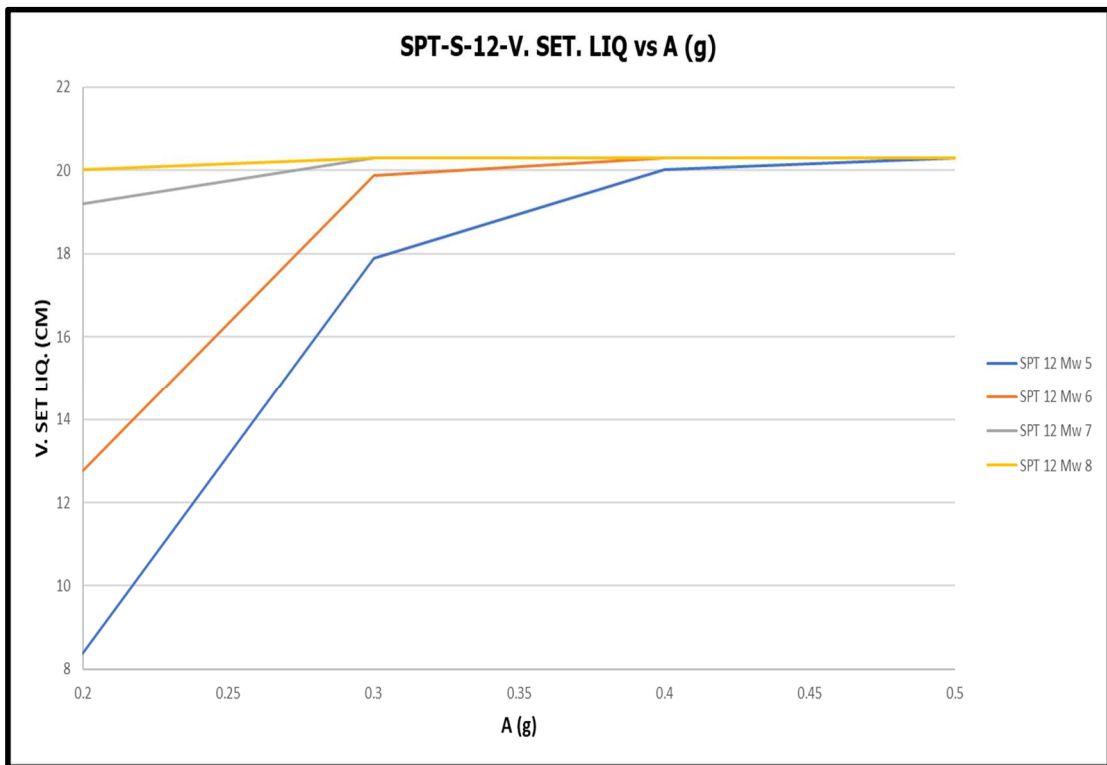


FIGURA 38: Comparación del V. Set. Liq. vs a para la perforación SPT S-12 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

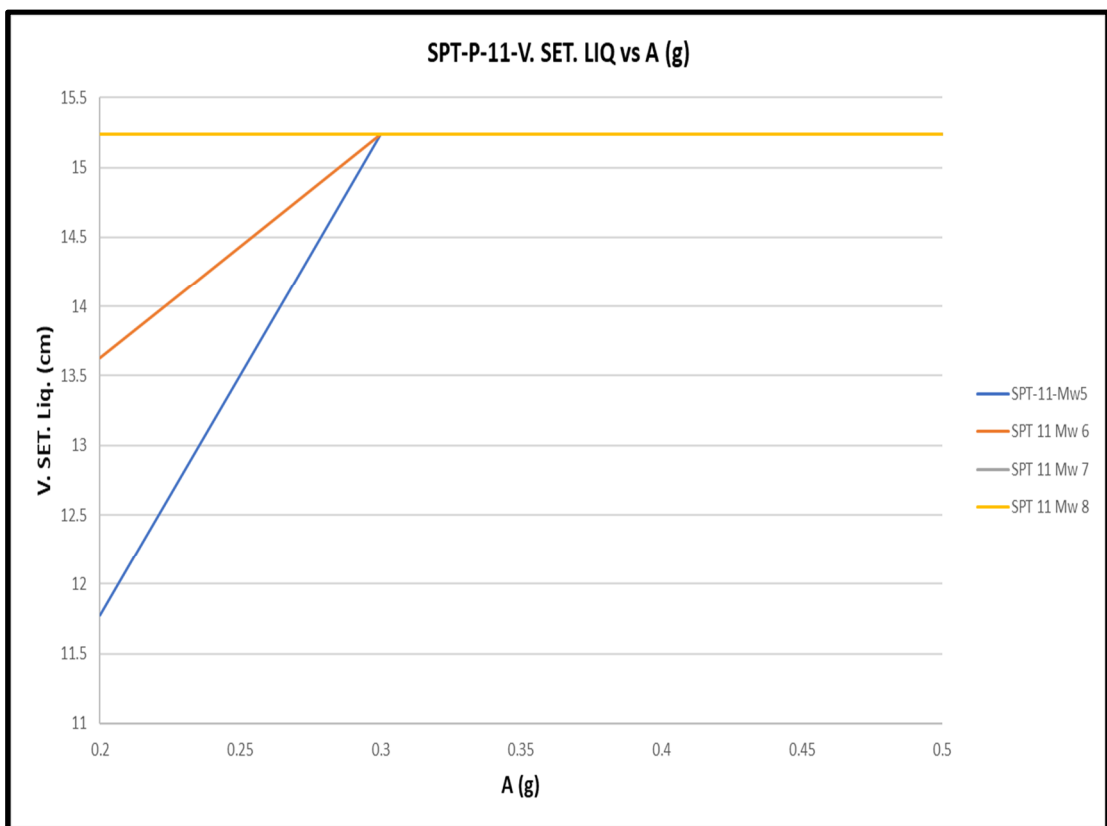


FIGURA 39: Comparación del V. Set. Liq. vs a para la perforación SPT P-11 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

De los resultados anteriores se puede observar que según la metodología utilizada (Boulanger & Idriss, 2014) se espera que exista licuación en el sitio para ambas perforaciones. Los valores de los factores de seguridad del perfil P-11 son considerablemente menores al del S-12 pero sus valores de LPI son menores también (uno espera que a menor FS mayor LPI), pero esto se debe a que en la perforación S-12 se consideró potencialmente licuable a un estrato que caía en el límite de ser considerado no licuable $IP=18$ y se encontró un lente de arena entre suelos finos, por lo tanto, al haber más estratos que licuarse el LPI aumentó.

Luego se puede ver que las gráficas tienen la tendencia esperada: el factor de seguridad disminuye a medida que aumenta la aceleración y la magnitud de momento, el LPI aumenta a medida que aumentan la aceleración y la magnitud de momento y los asentamientos verticales aumentan a medida que aumenta la aceleración y magnitud de momento, pero llega a un punto en el que se vuelve constante (se debe a que los estratos llegan a su esfuerzo cortante máximo más rápido).

Las comparaciones del factor de seguridad fueron evaluadas realizando un promedio de los factores de seguridad obtenidos en a las profundidades de (7 9.5m). Las comparaciones de LPI y asentamientos se las realizaron para los primeros 20 metros de profundidad. La perforación S-12 recuperó más muestras que la P-11, esto puede explicar la diferencia de los factores de seguridad.

6.2.2. Análisis para CPT – (Boulanger & Idriss, 2014)

Luego de haber realizado las correlaciones de I_c vs FC en la sección 6.1.2. como recomiendan Boulanger e Idriss (2014) se procedió a realizar la evaluación del potencial de licuación para las perforaciones CPT-1 y CPT-3. La evaluación se la realizó utilizando la metodología de Boulanger e Idriss (CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES, 2014) y con la ayuda del programa CLiq2. de la compañía Geologismiki. El programa permite realizar una evaluación continua de licuación de los datos obtenidos de un ensayo CPT utilizando distintas metodologías

Antes de explicar el proceso de evaluación de licuación en el programa se explicarán unos conceptos básicos de la evaluación del potencial de licuación utilizando esta metodología.

Como se dijo en la sección 5.1.2. al valor de q_{c1N} se lo tiene que corregir por contenido de finos, debido a que muchas expresiones dependen de este valor. Un suelo con mayor contenido de finos es más propenso a resistir la licuación y los valores de CSR. La expresión propuesta por Boulanger e Idriss (2014) se muestra a continuación:

$$q_{c1Ncs} = q_{c1N} + \Delta q_{c1Ncs} \quad (39)$$

Donde,

$$\Delta q_{c1Ncs} = \left(11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6}\right) \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left(\frac{15.7}{FC}\right)^2\right) \quad (40)$$

En la figura 40 se puede apreciar el comportamiento de Δq_{c1Ncs} que es ascendente a medida que aumenta el contenido de finos.

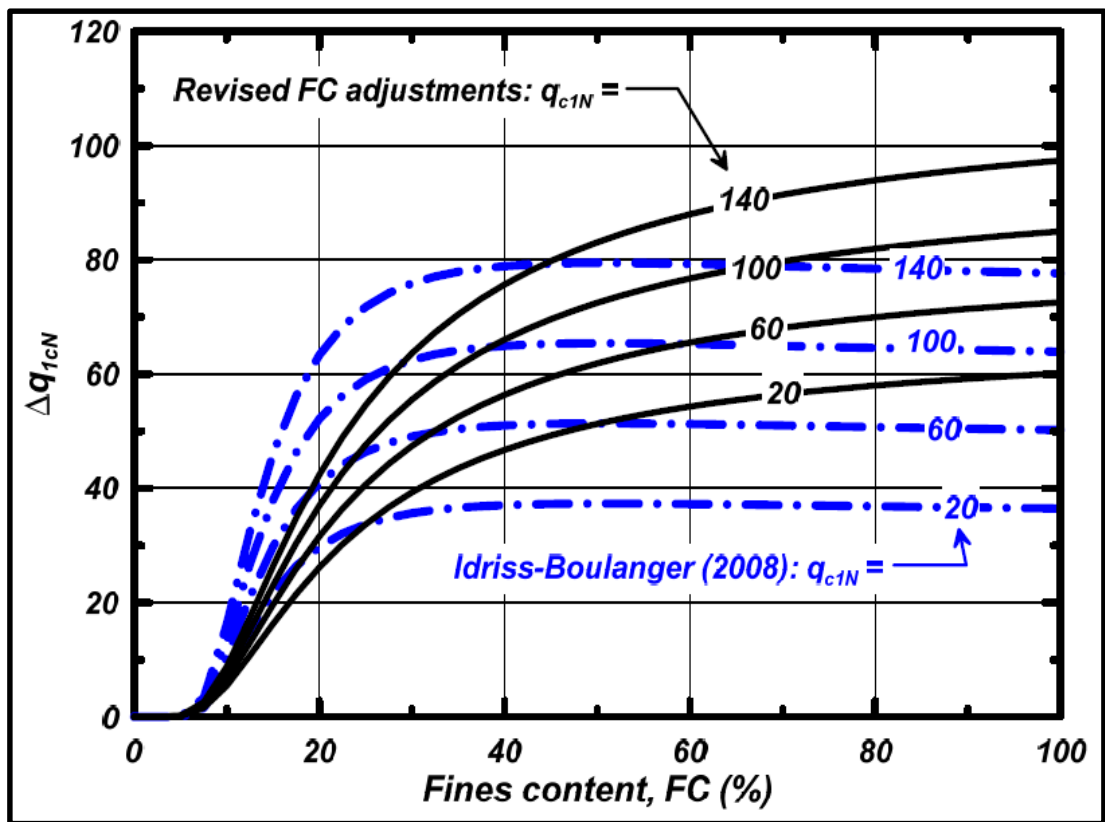


FIGURA 40: Ajuste de arena limpia equivalente para el procedimiento de desencadenamiento de licuación con datos CPT (Boulanger & Idriss, 2014)

Para encontrar el factor de seguridad a licuación se necesita conocer el valor de CRR de los estratos a analizar. La expresión propuesta por Boulanger e Idriss en su reporte (2014) para determinar el valor de $CCR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}}$ incluye correcciones a las expresadas en su monografía anterior (Idriss & Boulanger, 2008). La expresión propuesta es la siguiente

$$CCR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}} = \exp\left(\frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{c1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.8\right) \quad (41)$$

El valor de $CCR_{M=7.5\sigma'_{vc=1}}$ debe ser corregido para distintas magnitudes de momento y valores distintos al esfuerzo de confinamiento de 1 atmosfera de la manera indicada en literal 6.2. con las ecuaciones (29), (30) y (31). Los valores de MSF_{MAX} y C_σ recomendados por Boulanger e Idriss (2014) son:

$$MSF_{MAX} = 1.09 + \left(\frac{q_{c1Ncs}}{31.5}\right)^3 \leq 2.2 \quad (42)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{37.3 - 8.27(q_{c1Ncs})^{0.264}} \leq 0.3 \quad (43)$$

▪ Análisis de licuación en el programa CLiq2

Para comenzar a realizar el análisis en el programa CLiq2 se debe importar los datos básicos de una perforación CPT. Los datos básicos son la profundidad (depth) en metros, la resistencia de penetración de cono (q_c) en MPa, el valor de la fricción lateral (f_s) en KPa y el valor de la presión de poros medida en el cono (u) KPa.

Una vez importados estos 4 parámetros básicos el programa por si solo calcula e interpreta los resultados en base a los datos ingresados (Figuras 41 y 42). Ingresados los datos de los ensayos CPT (se puede realizar el análisis de varios perfiles CPT de manera simultánea) se procede a elegir las propiedades y parámetros del sismo para inducir la licuación, también se debe escoger el procedimiento a utilizar (Boulanger & Idriss, 2014) y permite elegir distintas opciones como: Ingresar valore de FCvs I_c (Idriss & Boulanger, 2008), elegir el valor C_{FC} (Boulanger & Idriss, 2014) que para este proyecto es de -0.395 como se explicó en la sección 6.1.2. También se asumió que el terreno no tiene ningún desnivel por lo que no se realizará la evaluación del desplazamiento lateral inducido por la licuación.

Luego de ingresar los datos básicos y propiedades de análisis, se corre el programa y se determinan los valores de FS, LPI y V. SET. Liq. Los valores de q_{c1Ncs} , CRR y CSR son calculados directamente por el programa usando las correcciones y parámetros anteriormente explicados. En las Figuras 43 y 44 se muestran capturas de los resultados determinados por el programa para ambas perforaciones con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y N.F.=2m.

Se realizaron bastantes análisis en el programa con distintos valores de M_w (5 -8), de a_{max} (0.2g – 0.5g) y nivel freático de 2 metros. Se graficaron los resultados de FS, LPI y V. Set. Liq. Los resultados de estos análisis se presentan en la FIGURAS 45-50.

Estos análisis fueron realizados con los criterios de zona de transición de expresados por Robertson (2008), donde expresa que los datos en transición del CPT no representan lo que ocurre en la realidad. Los rangos para transición que se utilizaron fueron de $I_c=2.2-3.2$.

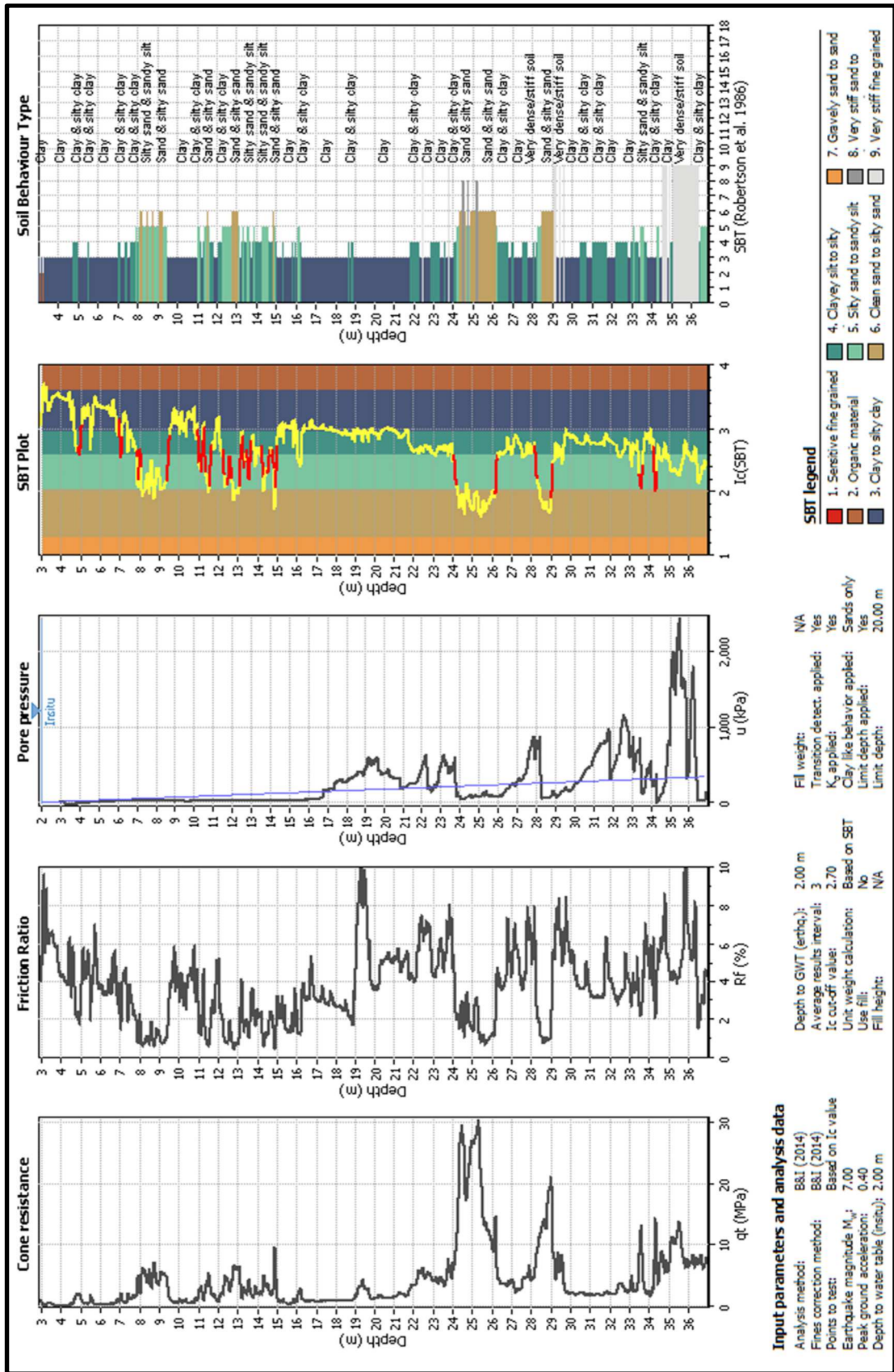


FIGURA 41: Captura de los datos (CPT – 1) ingresados y los resultados estimados en el programa CLiQ2 Boulanger e Idriss (2014)

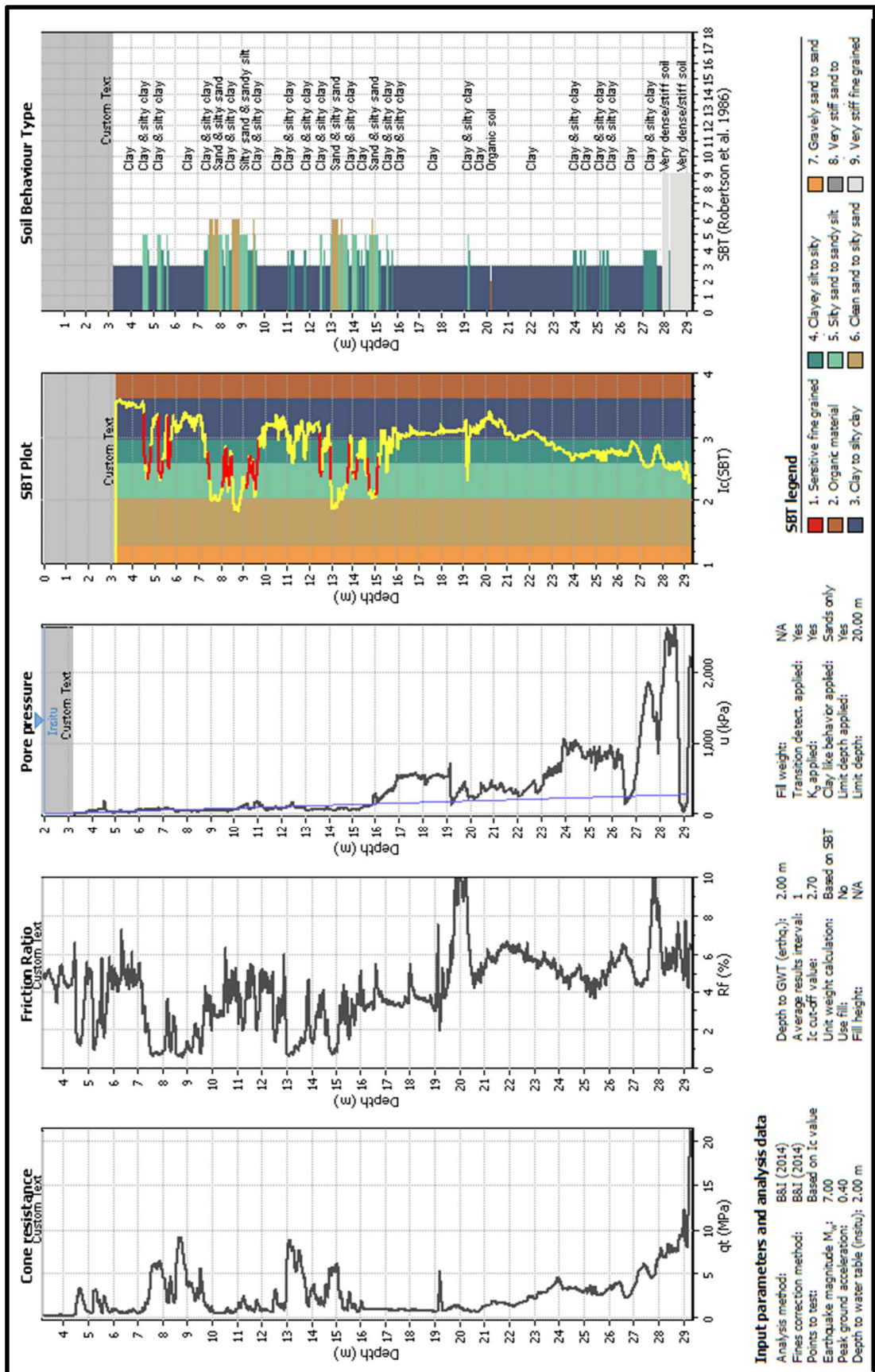


FIGURA 42: Captura de los datos (CPT – 3) ingresados y los resultados estimados en el programa CLiq2 Boulanger e Idriss (2014)

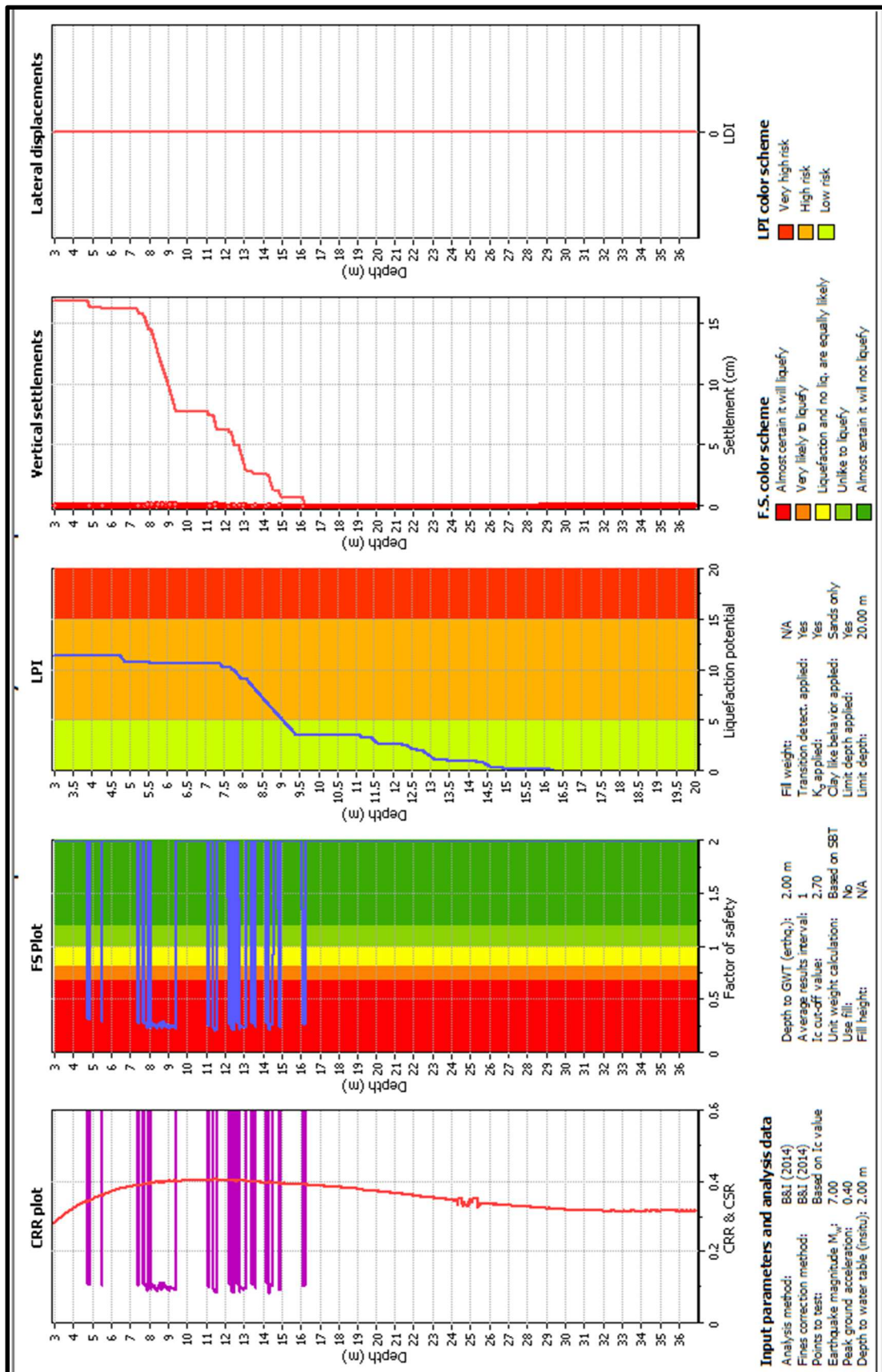


FIGURA 43: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil CPT-1 con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y $N.F.=2m$, utilizando el programa CLiq2 de Geologismiki. (Boulangier & Idriss, 2014)

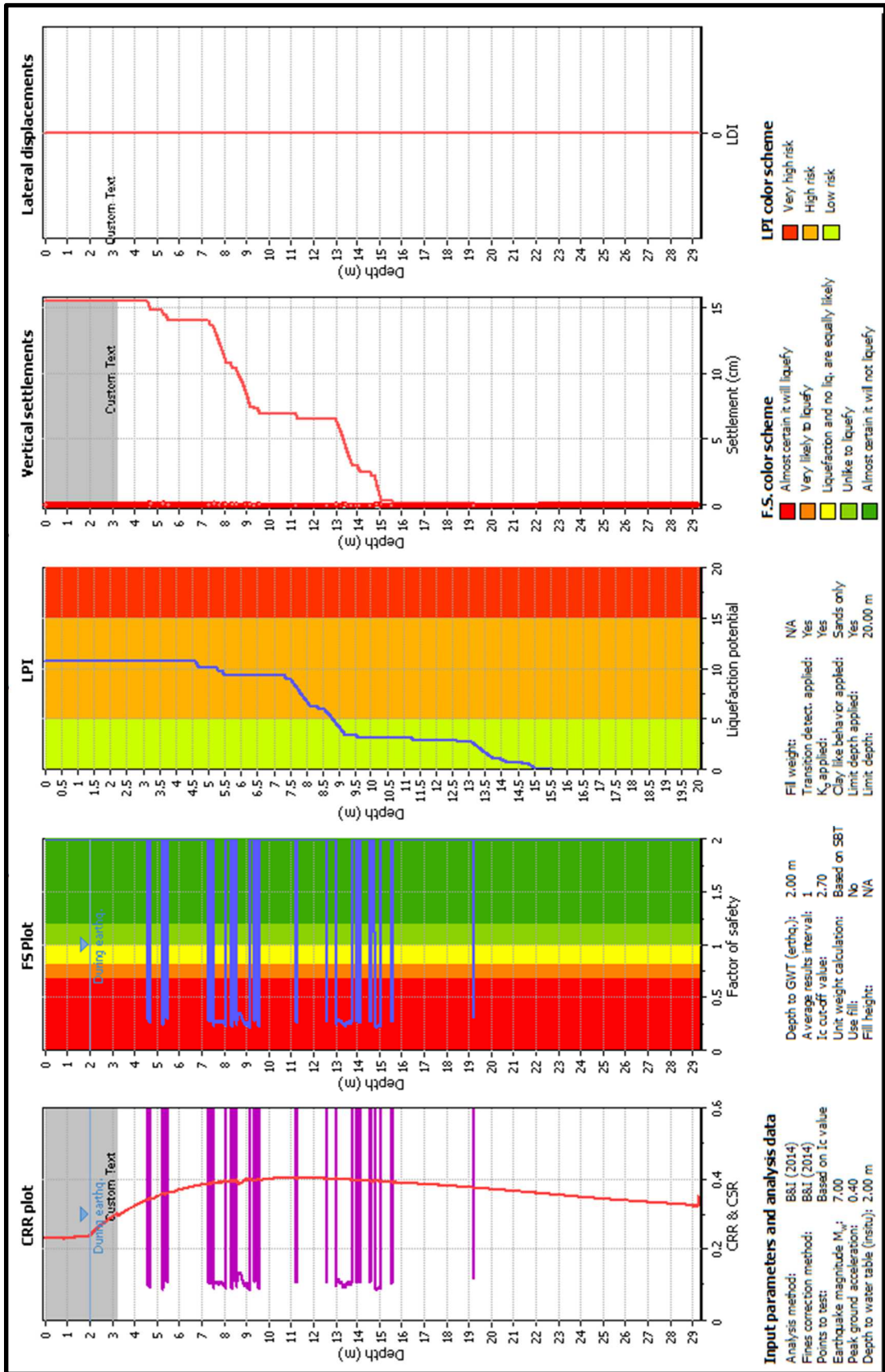


FIGURA 44: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil CPT-3 con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y N.F.=2m, utilizando el programa CLiq2 de Geologismiki. (Boulangier & Idriss, 2014)

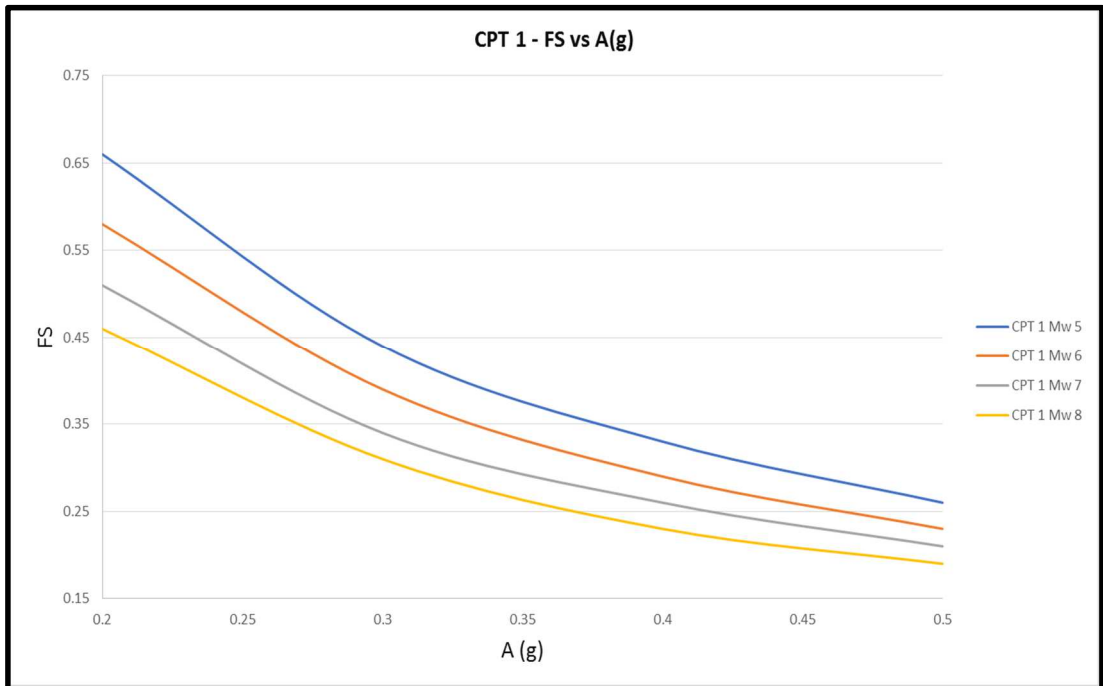


FIGURA 45: Comparación del FS vs a_{max} para la perforación CPT-1 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7.5 – 9.5m). Metodología Boulanger e Idriss (2014)

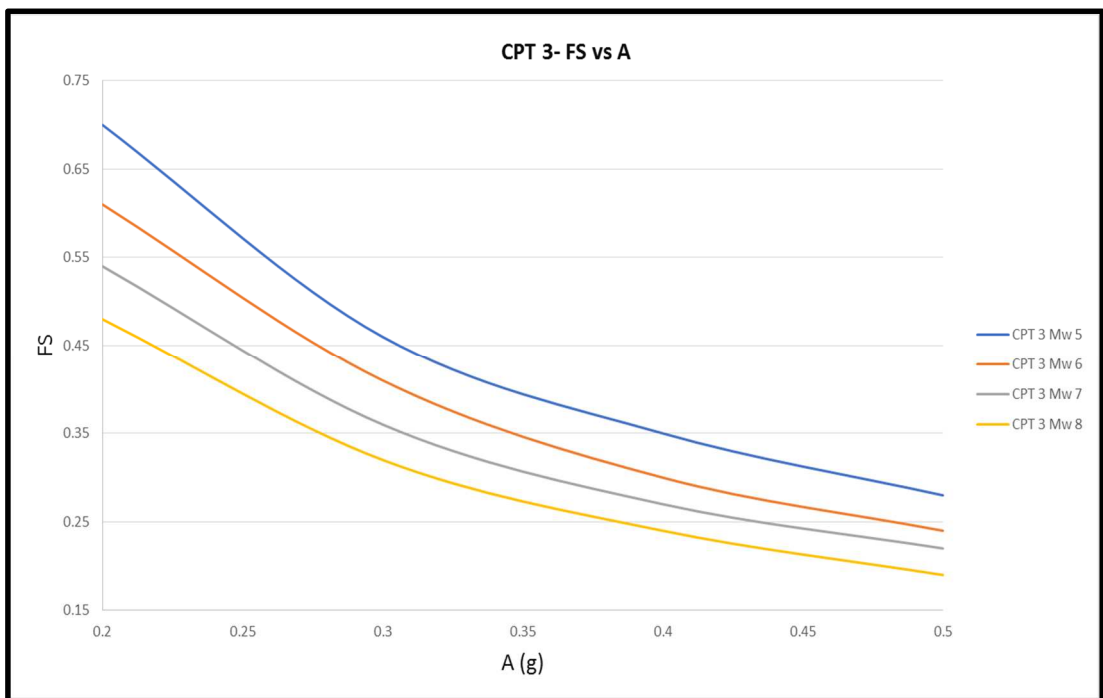


FIGURA 46: Comparación del FS vs a_{max} para la perforación CPT-3 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7.5 – 9.5m). Metodología Boulanger e Idriss (2014)

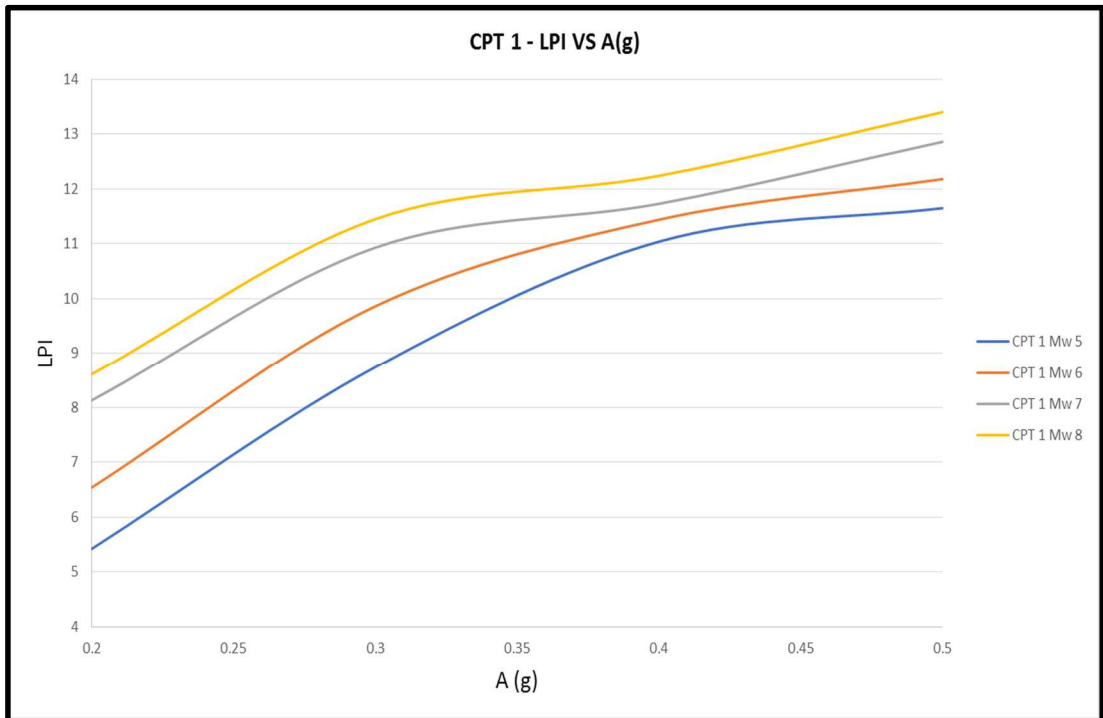


FIGURA 47: Comparación del LPI vs a_{max} para la perforación CPT-1 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

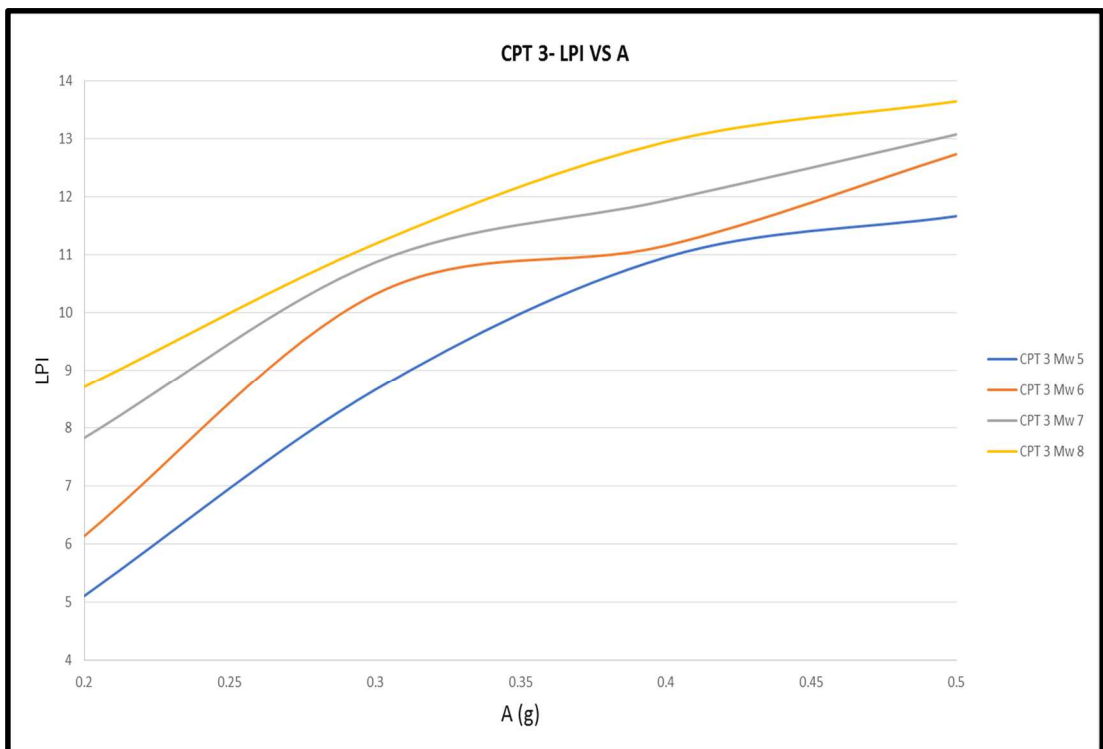


FIGURA 48: Comparación del LPI vs a_{max} para la perforación CPT-3 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

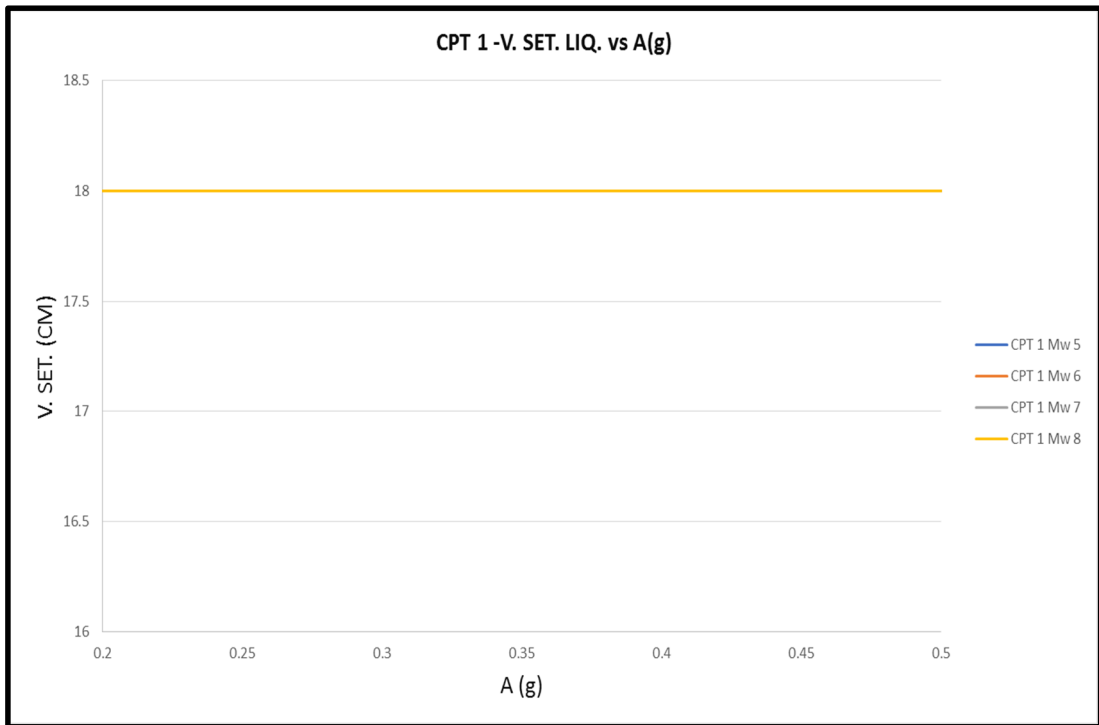


FIGURA 49: Comparación del V. Set. Liq. vs a_{max} para la perforación CPT-1 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

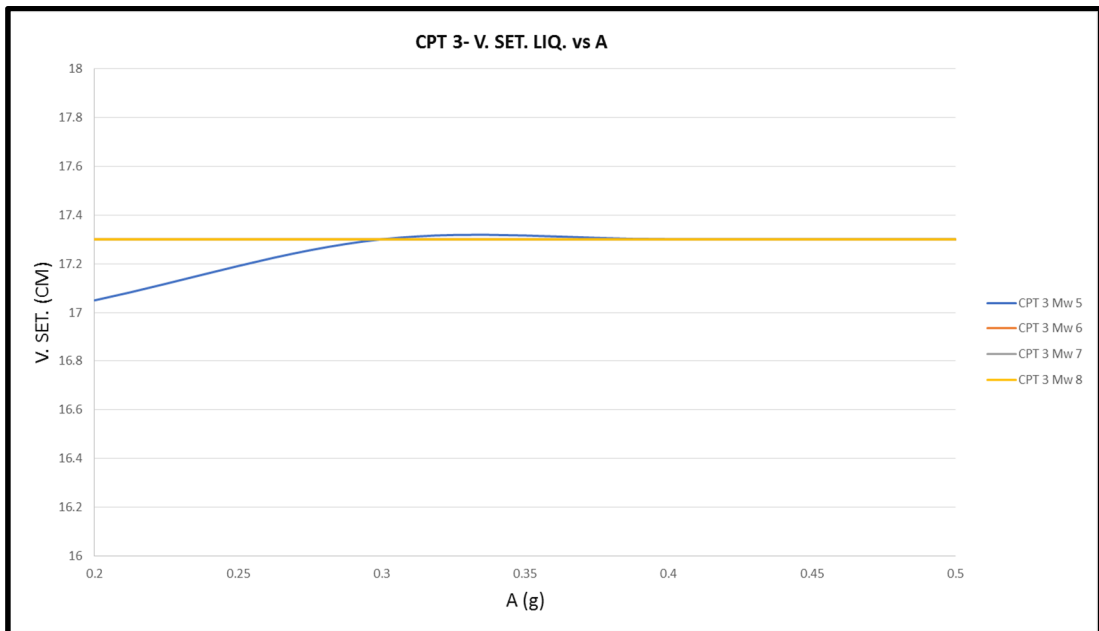


FIGURA 50: Comparación del V. Set. Liq. vs a_{max} para la perforación CPT-3 usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m. Metodología Boulanger e Idriss (2014)

En base a los resultados presentados en las Figuras 45-50 se puede observar que los valores de FS, LPI y V. SET. son bastante parecidos en las dos perforaciones (CPT-1 y CPT -3). En base a estos resultados se puede concluir que los estratos encontrados en las perforaciones (CPT-1 y CPT-3) son altamente licuables debido a que su factor de seguridad es menor a 0.8 para todos los análisis realizados y sus valores de LPI son mayores a 5.

6.2.3. Análisis para Vs - (Kayen, y otros, 2013)

Para los análisis de potencial de licuación utilizando el perfil Vs realizado en el sitio se asumirá que los estratos licuables estarán a la misma profundidad que los encontrados en las perforaciones SPT S-12 y SPT -P-11. También se utilizarán los parámetros obtenidos en ambas perforaciones para realizar los análisis (como se explica más adelante).

El análisis del potencial de licuación se lo realizó para la metodología de Kayen et al. en su trabajo (Shear-Wave Velocity–Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential, 2013) y con la ayuda del programa LiqSVs de la compañía Geologismiki (el mismo utilizado para el análisis con las perforaciones SPT).

Antes de explicar el desarrollo del análisis de licuación del programa, se presentarán las expresiones y parámetros básicos expresados por Kayen et al. (2013).

Para esta metodología no se realiza una corrección de las velocidades de onda de corte superficiales (Vs) por contenido de finos, como se explicó en la sección 5.1.3. Las velocidades de Ondas de Corte Superficiales son ensayos de poca deformación. Existe muy poca diferencia entre el G_{max} (módulo de corte) de las arenas y las arenas limosas o arcillosas, estos materiales (sometidos a deformaciones) exhiben en general la misma rigidez inicial (Iwasaki & Tatsuoka, 1977), (Kayen, y otros, 2013). El parámetro por utilizar y del que depende la mayoría de los resultados será el de V_{s1} que está corregido por confinamiento.

Para calcular el valor del factor de seguridad a licuación se utiliza la ecuación (6) de la sección 4.2. El valor de CSR se lo calcula con la ecuación (18) presentada en el capítulo 4.3.3. y el valor de r_d se lo calcula de manera diferente a las metodologías para SPT y CPT utilizadas en este estudio, r_d para la metodología de Vs del presente proyecto es calculado de acuerdo con lo propuesto por Kayen et al. (2013) que es,

$$r_d = \frac{\left(1 + \frac{-23.013 - 2.949 * a_{max} + 0.999 * MW + 0.0525 * V_{s,12m}^*}{16.258 + 2.01 * e^{0.341 * (-d + 0.0785 * V_{s,12m}^* + 7.586)}}\right)}{\left(1 + \frac{-23.013 - 2.949 * a_{max} + 0.999 * MW + 0.0525 * V_{s,12m}^*}{16.258 + 2.01 * e^{0.341 * (0.0785 * V_{s,12m}^* + 7.586)}}\right)} \pm \sigma_{erd} \quad (44)$$

Donde $V_{s,12m}^*$ es la velocidad de onda de corte promedio en los 12 metros superiores (Kayen, y otros, 2013) y σ_{erd} es la desviación estándar de r_d y se calcula como (Kayen, y otros, 2013):

$$\sigma_{erd}(d) = d^{0.85} * 0.0198 \quad (44) \quad \text{para } d < 12.2m$$

$$\sigma_{erd}(d) = 12.2^{0.85} * 0.0198 \quad (45) \quad \text{para } d \geq 12.2m$$

El valor de P_L (probabilidad de licuación) y CRR propuestos por Kayen et. al. (2013) son:

$$P_L = \Phi \left\{ - \frac{[(0.0073 * V_{s1})^{2.8011} - 1.946 * \ln(CSR) - 2.6168 * \ln(M_w) - 0.0099 * \ln(\sigma'_{vc}) + 0.0028 * FC]}{0.4809} \right\} \quad (45)$$

$$CRR = \exp \left\{ - \frac{[(0.0073 * V_{s1})^{2.8011} - 2.6168 * \ln(M_w) - 0.0099 * \ln(\sigma'_{vc}) + 0.0028 * FC - 0.4809 * \Phi^{-1}(P_L)]}{1.946} \right\} \quad (46)$$

El factor Φ es la distribución normal acumulada explicada en (Kayen, y otros, 2013).

Los valores de CRR y CSR para esta metodología ya se encuentran aptos para todo tipo de Magnitud de momento M_w . sin corrección alguna, pero en caso de querer normalizarlo se lo puede hacer de esta manera (Kayen, y otros, 2013):

$$CSR^* = CSR_{M=7.5\sigma'_{vc}=1} = \frac{CSR}{DWF * K_\sigma} \quad (47)$$

El valor de K_σ para este método varía entre 0.95 –1 (Kayen, y otros, 2013), el valor de DWF es el factor de ajuste de la duración del terremoto y es similar al factor MSF utilizado en las metodologías CPT y SPT. El valor de DWF se lo calcula con la siguiente expresión (Kayen, y otros, 2013):

$$DWF = 15 * M_w^{-1.342} \quad (48)$$

- **Análisis de licuación para Vs en el programa LiqSVs**

Para empezar a realizar el análisis de licuación en el programa LiqSVs se deben ingresar los datos básicos necesarios para realizar la evaluación. Los datos por ingresar son la profundidad (Depth (m)), la velocidad (Vs (m/s)), peso específico (KN/m³), espesor del estrato licuable (Infl. Depth (m)) y se puede escoger cuales estratos son susceptibles a licuarse y cuáles no. Para escoger los estratos que se pueden licuar se utilizaron las perforaciones (S-12 y P-11) y se elaboró un análisis para cada una. En las Figura 51 y 52 se muestran capturas de los datos ingresados al programa. Los valores de FC y peso específico fueron hallados gracias a la información obtenida de las perforaciones SPT-12 y SPT-11.

No	Depth (m)	Vs (m/s)	FC (%)	Unit Weight (kN/m ³)	Infl. Depth (m)	Can Liquefy
1	2.00	270.00		17.20	2.000	<input type="checkbox"/>
2	2.00	150.00	99.00	17.20	0.250	<input type="checkbox"/>
3	2.50	150.00	99.00	14.50	0.250	<input type="checkbox"/>
4	2.50	92.00	99.00	14.50	2.250	<input type="checkbox"/>
5	7.00	92.00	65.00	16.25	1.000	<input type="checkbox"/>
6	7.00	132.00	65.00	16.25	0.250	<input type="checkbox"/>
7	7.50	132.00	23.00	17.50	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
8	9.50	132.00	21.00	17.75	1.500	<input checked="" type="checkbox"/>
9	10.50	132.00	92.00	16.00	1.000	<input type="checkbox"/>
10	11.50	132.00	34.00	17.40	1.250	<input checked="" type="checkbox"/>
11	13.00	132.00	64.00	16.80	1.500	<input checked="" type="checkbox"/>
12	14.50	132.00	19.00	18.20	0.750	<input checked="" type="checkbox"/>
13	14.50	110.00	19.00	18.20	1.000	<input type="checkbox"/>
14	19.50	110.00	98.00	17.00	1.000	<input type="checkbox"/>
15	19.50	330.00	98.00	17.00	1.000	<input type="checkbox"/>
16	23.50	330.00	90.00	16.85	1.000	<input type="checkbox"/>
17	23.50	250.00	90.00	16.85	1.000	<input type="checkbox"/>
18	30.50	250.00	88.00	19.25	1.000	<input type="checkbox"/>
19	30.50	320.00	88.00	19.25	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
20	40.50	320.00	19.00	20.50	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
21	40.50	420.00	19.00	20.50	1.000	<input type="checkbox"/>
22	50.00	420.00		20.00	1.000	<input type="checkbox"/>
23						<input checked="" type="checkbox"/>
24						<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 51: Captura de los datos ingresados al programa LiqSVs del perfil Vs (utilizando los estratos susceptibles a licuación de S-12) realizado en el proyecto.

No	Depth (m)	Vs (m/s)	FC (%)	Unit Weight (kN/m³)	Infl. Depth (m)	Can Liquefy
1	2.00	270.00		17.20	2.000	<input type="checkbox"/>
2	2.00	150.00	99.00	17.20	0.250	<input type="checkbox"/>
3	2.50	150.00	99.00	14.50	0.250	<input type="checkbox"/>
4	2.50	92.00	99.00	14.50	2.250	<input type="checkbox"/>
5	7.00	92.00	65.00	16.25	1.000	<input type="checkbox"/>
6	7.00	132.00	65.00	16.25	0.250	<input type="checkbox"/>
7	8.00	132.00	23.00	17.50	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
8	9.00	132.00	21.00	17.75	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
9	10.00	132.00	92.00	16.00	1.000	<input type="checkbox"/>
10	11.00	132.00	34.00	17.40	1.250	<input type="checkbox"/>
11	12.00	132.00	64.00	16.80	1.000	<input type="checkbox"/>
12	14.00	132.00	19.00	18.20	2.000	<input checked="" type="checkbox"/>
13	14.50	132.00	19.00	18.20	0.250	<input type="checkbox"/>
14	14.50	110.00	19.00	18.20	1.000	<input type="checkbox"/>
15	19.50	110.00	98.00	17.00	1.000	<input type="checkbox"/>
16	19.50	330.00	98.00	17.00	1.000	<input type="checkbox"/>
17	23.50	330.00	90.00	16.85	1.000	<input type="checkbox"/>
18	23.50	250.00	90.00	16.85	1.000	<input type="checkbox"/>
19	30.50	250.00	88.00	19.25	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
20	30.50	320.00	88.00	19.25	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
21	40.50	320.00	19.00	20.50	1.000	<input type="checkbox"/>
22	40.50	420.00	19.00	20.50	1.000	<input type="checkbox"/>
23	50.00	420.00		20.00	1.000	<input checked="" type="checkbox"/>
24						<input checked="" type="checkbox"/>

Quick Info...
 Magnitude: 7.00
 Acceleration: 0.40 g
 GWT Insitu: 2.00 m
 GWT Eq.: 2.00 m
 Method: Kayen et al. 2013

FIGURA 52: Captura de los datos ingresados al programa LiqSVs del perfil Vs (utilizando los estratos susceptibles a licuación de P-11) realizado en el proyecto.

Se deben ingresar las propiedades de análisis, que son: la magnitud del momento del Sismo (M_w), la aceleración máxima de la superficie del terreno (a_{max}) y el nivel freático al momento del sismo (que para todos los análisis será de dos metros de profundidad).

En otra pestaña de las propiedades de análisis se escoge el tipo de metodología a utilizar (Se puede escoger entre Kayen et al (2013) y NCEER (1997)), Se puede elegir si la superficie del terreno se asume sin ningún tipo de desnivel, pendiente leve o un talud considerable; para este proyecto se asumió que el terreno no presenta desniveles por lo que no existirá desplazamiento lateral.

Luego de ingresar los datos básicos y propiedades de análisis, se corre el programa y se determinan los valores de FS, LPI y V. SET. Liq. Los valores de V_{s1} , CRR y CSR son calculados directamente por el programa usando las

correcciones y parámetros anteriormente explicados. En las Figuras 53 y 54 se muestran capturas de los resultados determinados por el programa para ambas perforaciones con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y N.F.=2m.

Se realizaron bastantes análisis en el programa con distintos valores de M_w (5 -8), de a_{max} (0.2g – 0.5g) y nivel freático de 2 metros. Se graficaron los resultados de FS, LPI y V. Set. Liq. Los resultados de estos análisis se presentan en las figuras 55-58.

De los resultados se puede notar que el factor de seguridad en los estratos comprendido entre 7-9.5 metros de profundidad no tienen variación entre los dos perfiles ingresados, esto se debe a que las velocidades y contenido de finos son los mismos para ambos perfiles.

De ambos análisis se puede esperar que se encuentre daño en la superficie debido a que los valores de LPI en su mayoría son mayores a 5 y para sismos de gran magnitud e intensidad superan los 15, lo cual indica una certeza de daño en la superficie. Los valores de LPI varían con respecto a un valor y otro debido a que el perfil elaborado con S-12 posee más estratos licuables (mayor espesor acumulado) tiene mayores valores de LPI que el P-11.

No se presentan los resultados de los asentamientos ocasionados por la licuación con la metodología de V_s ya que no se encontró una correlación directa de V_s vs ϵ_v lo que hace el programa es primero encontrar valores de q_{c1Ncs} para las V_s corregidas con la metodología de Andrus et. al. (2004) y ahí calcula los valores de ϵ_v . A criterio del autor es necesario realizar una correlación directa con las velocidades de onda.

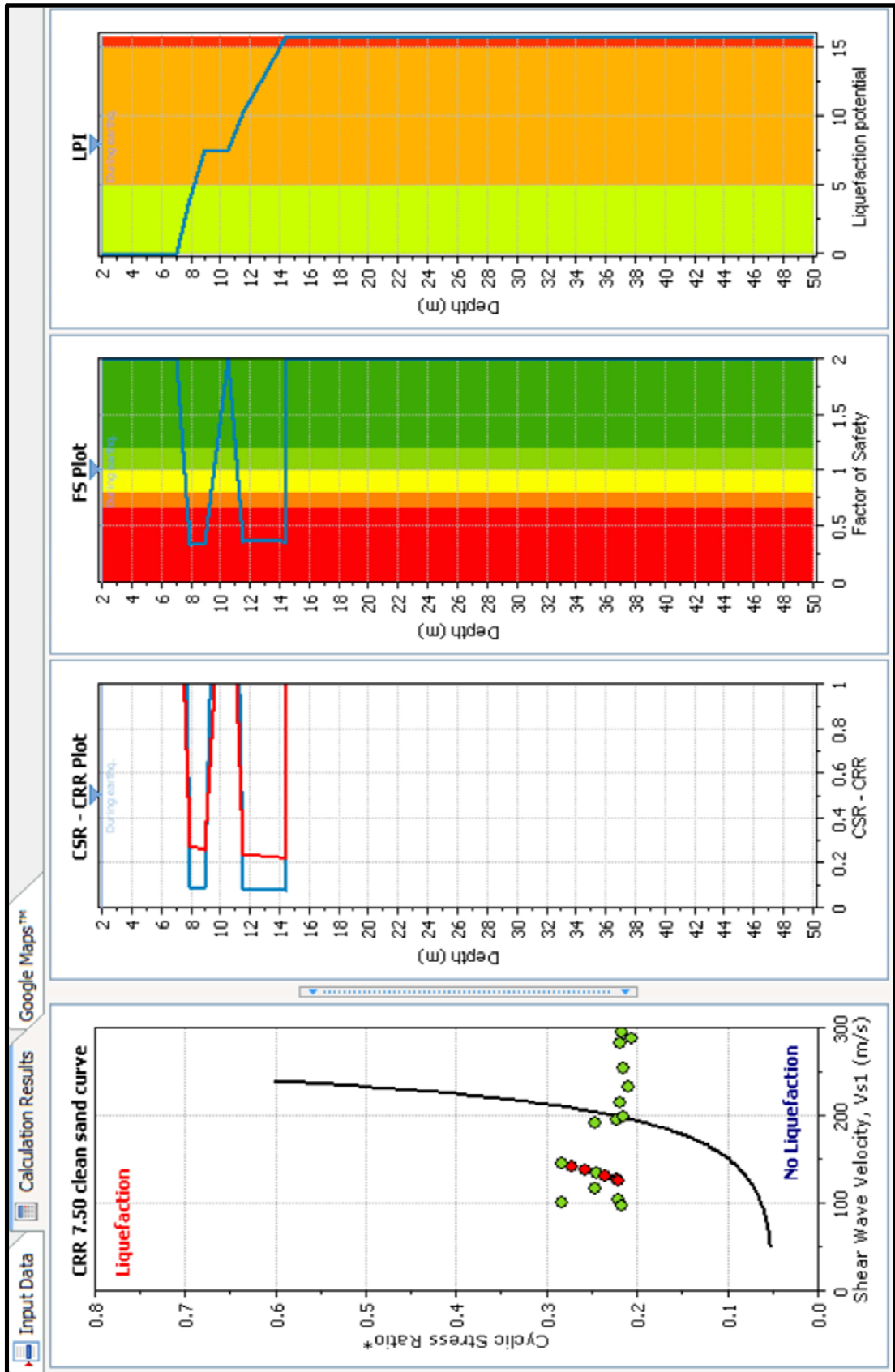


FIGURA 53: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil Vs(S-12) con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y $N.F.=2m$, utilizando el programa LiqSVs de Geologismiki. (Kayen, y otros, 2013)

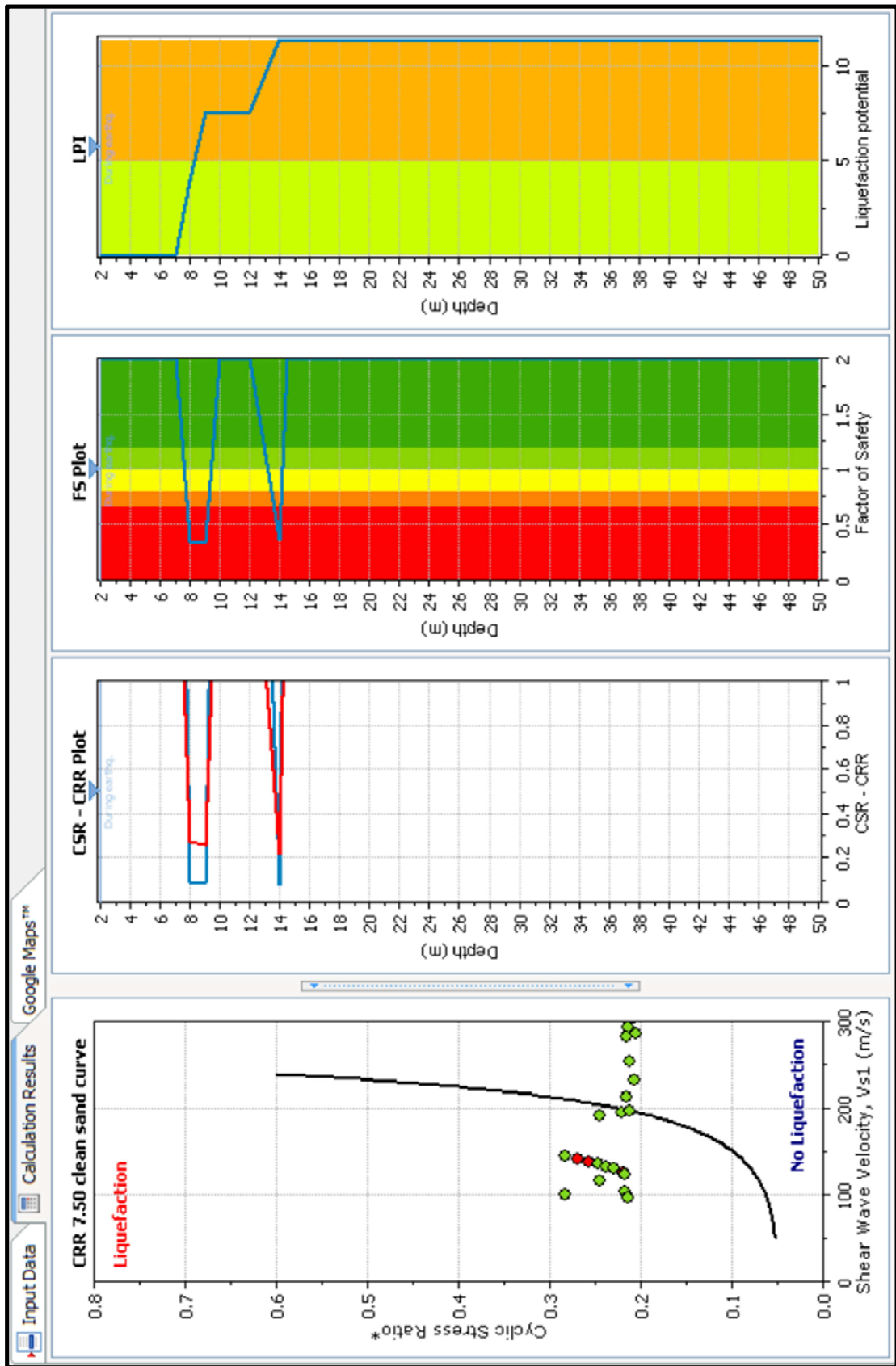


FIGURA 54: Resultado del análisis de potencial de licuación para el perfil Vs(P-11) con $M_w=7$, $a_{max}=0.4g$ y $N.F.=2m$, utilizando el programa LiqSVs de Geologismiki. (Kayen, y otros, 2013)

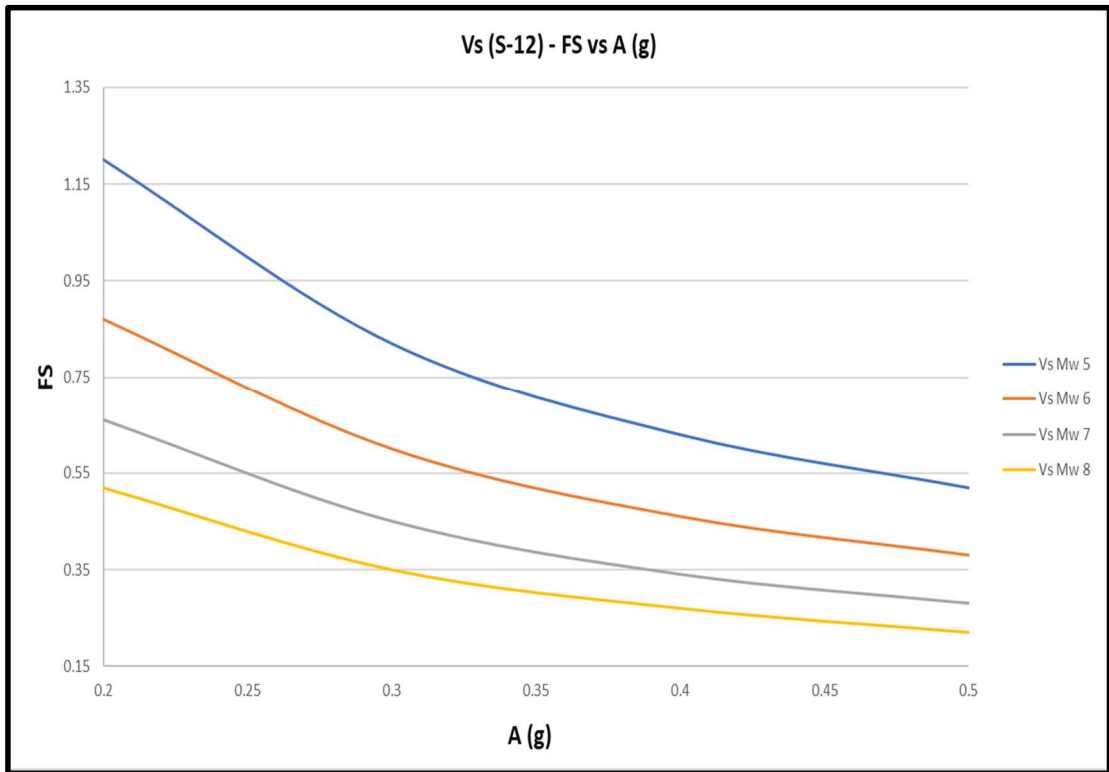


FIGURA 55: Comparación del FS vs a_{max} para el perfil Vs(S-12) realizado en el proyecto usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7 – 9.5m). (Kayen, y otros, 2013)

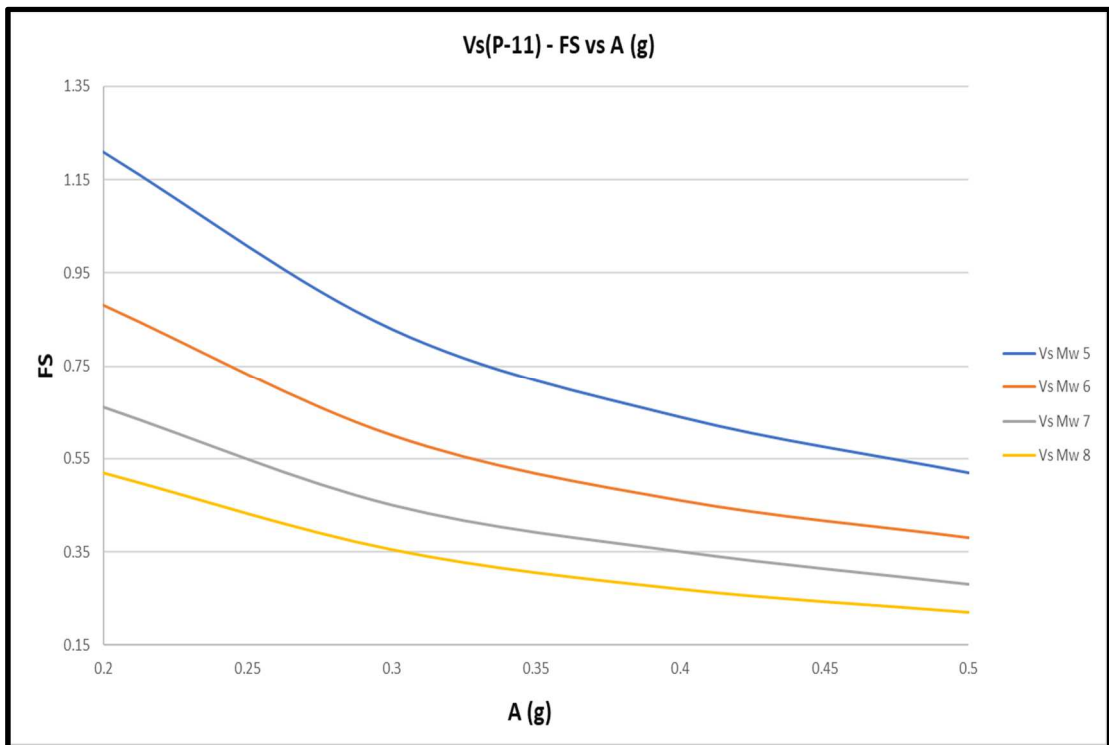


FIGURA 56: Comparación del FS vs a_{max} para el perfil Vs(P-11) realizado en el proyecto usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (profundidad de 7 – 9.5m). (Kayen, y otros, 2013)

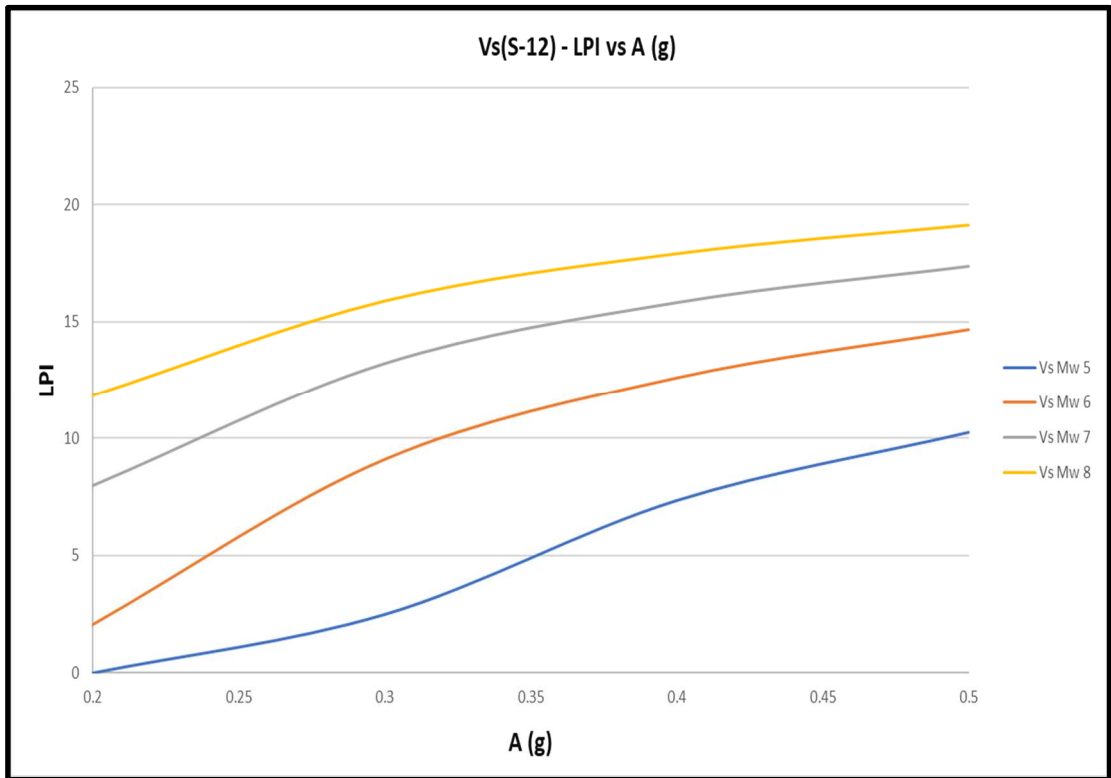


FIGURA 57: Comparación del LPI vs a_{max} para el perfil Vs(S-12) realizado en el proyecto usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (Kayen, y otros, 2013)

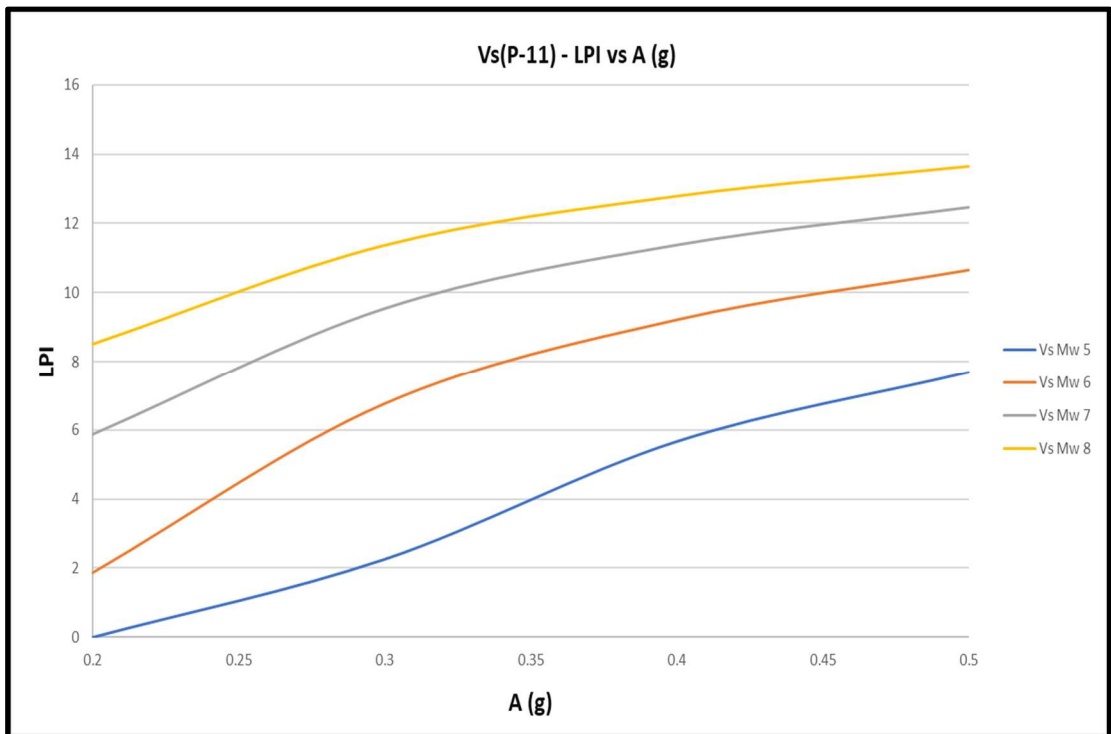


FIGURA 58: Comparación del LPI vs a_{max} para el perfil Vs(P-11) realizado en el proyecto usando distintos valores de Mw. y Nivel Freático=2m (Kayen, y otros, 2013)

6.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LICUACIÓN

Los análisis realizados en la sección 6.2. serán comparados entre sí para observar las diferencias entre las distintas metodologías. Se compararán los resultados utilizando una magnitud de momento M_w 7, un nivel freático de 2 metros y un rango de aceleraciones entre 0.2-0.5g. Los valores por comparar serán el factor de seguridad (FS), el índice de potencial de licuación (LPI) y los asentamientos verticales por licuación (V. SET. LIQ.). Como se dijo anteriormente no se evaluará el valor de desplazamiento lateral o LDI debido a que para todas las metodologías se asumió que el terreno no tiene desniveles.

Como se ve en las figuras 4 y 22 los ensayos CPT-1 y SPT S-12 se los realizaron en el mismo lugar. Las perforaciones SPT P-11 y CPT-3 tienen aproximadamente 12 metros de separación y la separación entre el CPT-1 y CPT-3 es de aproximadamente 90 metros. Los ensayos MASW y MAM se realizaron aproximadamente en la mitad dentro de estas perforaciones, los ensayos geofísicos (especialmente MAM) abarcan una gran área y realizan un promedio de V_s del área abarcada. Es importante tener en cuenta estos antecedentes para poder interpretar de mejor manera los resultados.

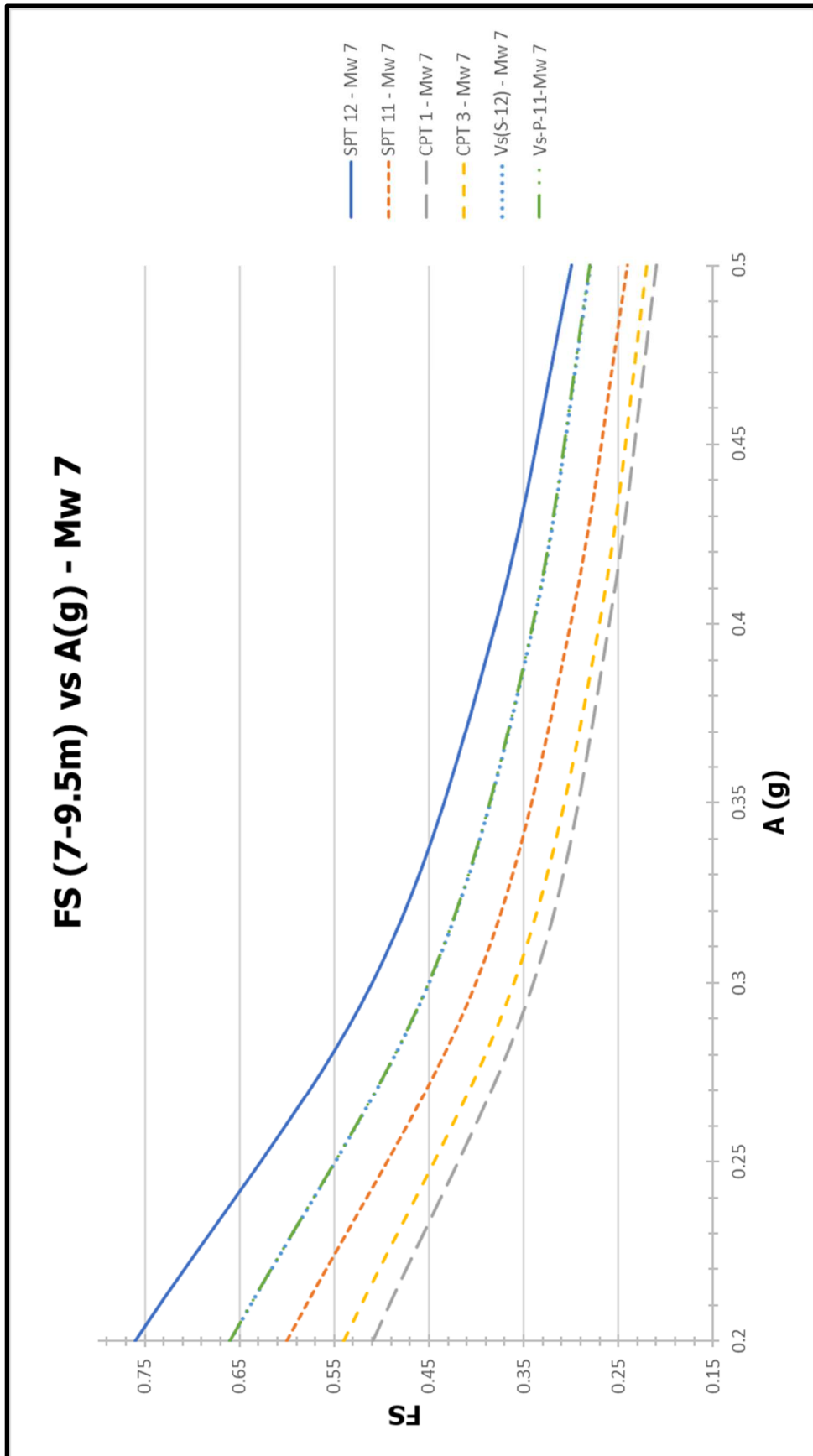


FIGURA 59: Comparación de FS vs a_{max} (para las profundidades de 7 – 9.5m) utilizando distintos ensayos y metodologías utilizando Mw. 7 y nivel freático de 2m.

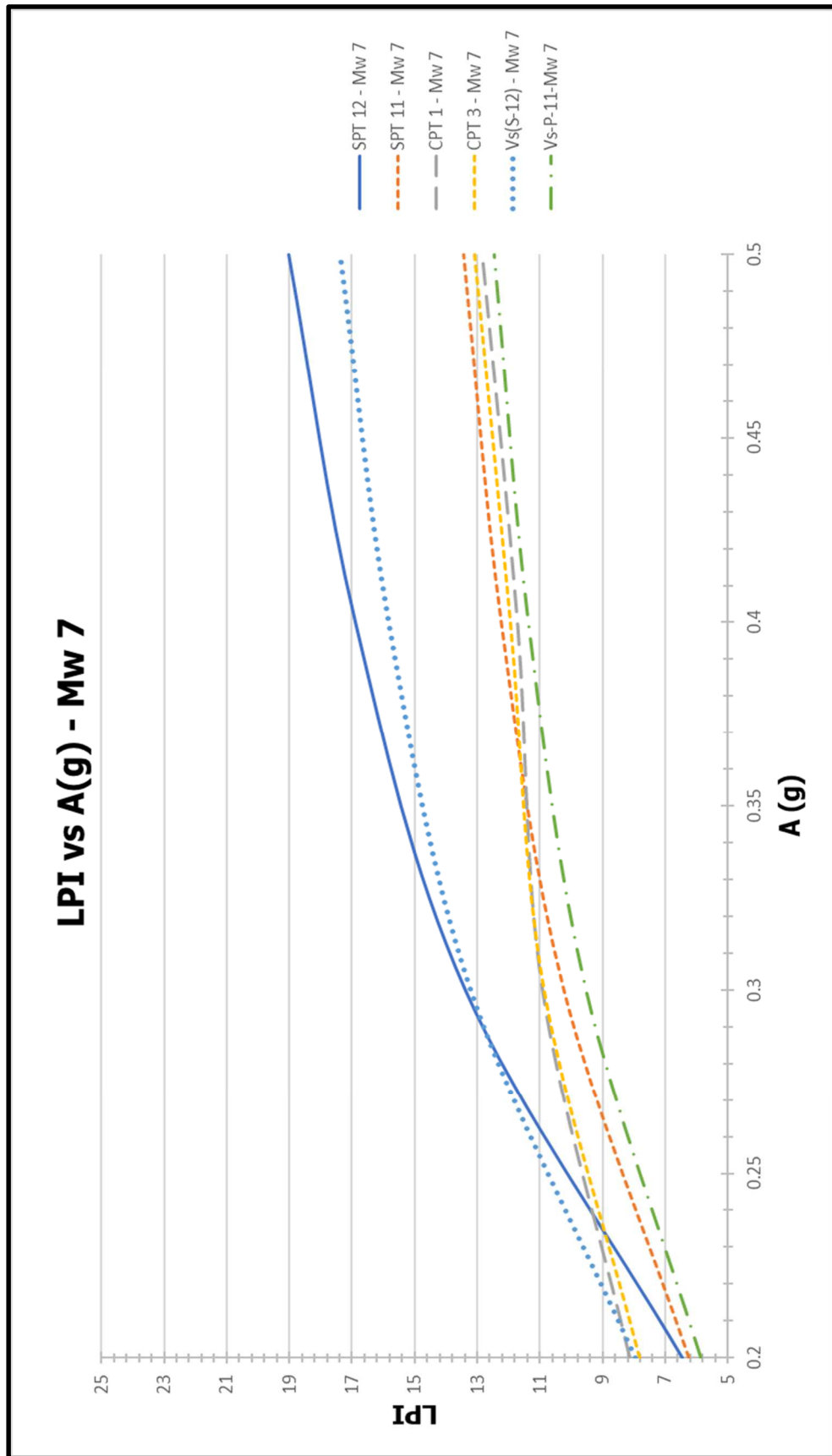


FIGURA 60: Comparación de LPI vs a_{max} utilizando distintos ensayos y metodologías utilizando Mw. 7 y nivel freático de 2m.

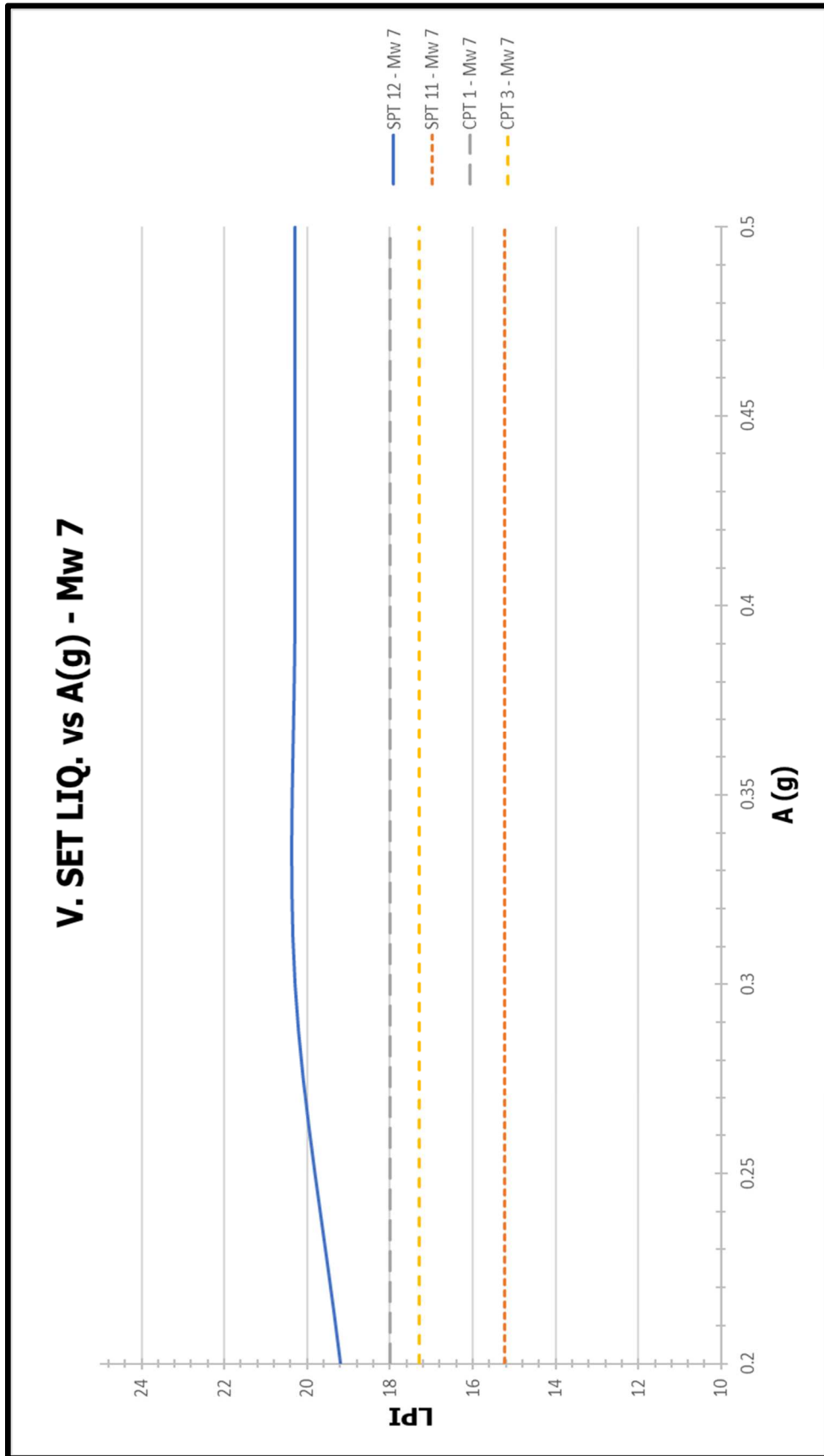


FIGURA 61: Comparación de VET. SET. LIQ. vs a_{max} utilizando distintos ensayos y metodologías utilizando Mw 7 y nivel freático de 2m.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados mostrados en las secciones 6.2 y 6.3 se pueden obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones

- Con los resultados obtenidos se puede deducir que existirá licuación para el sismo de diseño.
- También se puede ver que los valores de LPI están entre 5 y 15 por lo que se puede esperar una severidad intermedia en el sitio de estudio y con sismos de gran magnitud podría alcanzar una severidad alta.
- Los asentamientos están entre 15 – 20 cm dependiendo de la metodología y ensayos utilizados. Son asentamientos que se deben tomar en cuenta para el diseño de las estructuras, ya que los asentamientos diferenciales pueden ser considerables
- Hay diferencias notorias entre los resultados de las perforaciones SPT (S-12 y P-11). El ensayo S-12 recuperó más muestras dentro de los estratos considerados licuables (7-15m) por lo que el análisis es más sensible y real, sin embargo en el perfil S-12 se consideró licuable un estrato ML con $IP=18$ y $FC>70\%$ que se encontraba en el límite entre probablemente licuable y no licuable según (Bray & Sancio, 2006) y era considerado no licuable según (Boulanger & Idriss, 2006). Por lo tanto, el análisis para el estrato S-12 es muy conservador.
- Los resultados de los análisis por la metodología CPT de ambas perforaciones (CPT-1 y CPT-3) son muy parecidos, lo cual nos indica la ventaja de este tipo de sondeo para caracterizar el suelo. Al parecer los resultados con CPT son muy conservadores con respecto a los otros ensayos en el factor de seguridad (figura 61), pero en cuanto a los valores de LPI y asentamientos están dentro de los rangos normales obtenidos en este proyecto.
- El análisis por la metodología de V_s (Kayen, y otros, 2013) tiene valores de FS dentro de los rangos entre las dos perforaciones SPT. Los perfiles V_s dependen mucho de las perforaciones para poder identificar los estratos susceptibles a licuación. Como se puede ver los valores de LPI varían mucho para los análisis V_s (S-12) y V_s (P-11).
- La ventaja de los ensayos CPT son su continuidad por lo que sus resultados pueden ser más reales que los de otros métodos. Son muy buenos estimando los valores severidad (LPI y asentamientos) en comparación con los otros ensayos.

- La desventaja de los ensayos CPT son su costo y que la norma NEC-15 obliga realizar al menos una perforación SPT.
- Otra desventaja de la metodología CPT es la incertidumbre de las relaciones I_c vs F_C (Boulangier & Idriss, 2014). El método te permite estimar $C_{FC}=0$ pero debido a la dispersión no es algo muy real. Como se lo hizo en este proyecto se debe encontrar el valor de C_{FC} característico para el sitio de estudio haciendo las relaciones I_c vs F_C . El valor de C_{FC} para este proyecto fue de -0.39.
- Los análisis para SPT son los más estudiados y son bastante cercanos a la realidad y conservadores, pero el problema es la incertidumbre que hay entre muestra y muestra y la diferencia que puede tener entre un ensayo y otro. Para un correcto análisis sería recomendable recoger muestras con más frecuencia en los primeros 20 metros.
- Los ensayos geofísicos para encontrar los perfiles V_s son económicos en comparación con los otros ensayos (CPT y SPT) y abarcan un área mucho más grande.
- Se puede ver por los resultados mostrados que los valores de FS, LPI y CPT-1 y CPT-3 son bastante parecidos y parece que son los representativos del proyecto.
- Los valores obtenidos por la metodología para CPT fueron realizados incluyendo el criterio de transición de suelos de Robertson (2008), si se realiza la evaluación sin este criterio los valores de LPI y asentamientos crecerán considerablemente lo cual podría ser extremadamente conservador. Para este proyecto se utilizó un rango de $I_c=2.2-3.2$ lo cual también es conservador.
- Los ensayos SPT son de vital importancia ya que son los únicos que recuperan muestra, pero es recomendable combinarlo con los otros ensayos.
- La metodología de V_s es la más reciente y debe ser investigada más, Los ensayos V_s son más económicos y abarcan una mayor área que las otras dos por lo que en un futuro podría ser más utilizada.

8. REFERENCIAS

- Andrus, R. D., Piratheepan, P., Ellis, B. S., Zhang, J., & Juang, C. H. (2004). *Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-VS relationships. Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 713-721.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2004). *EVALUATING THE POTENTIAL FOR LIQUEFACTION OR CYCLIC FAILURE OF SILTS AND CLAYS*. Davis, CA: University of California at Davis.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2006). *Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 1413-426.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES*. Davis, CA.: University of California at Davis.
- Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). *Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, 1165-177.
- DeAlba, P., Seed, H. B., & Chan, C. K. (1976). *Sand Liquefaction in large scale simple shear test. J. Geotechnical Eng. Div., ASCE 102 (GT9)*, 909-27.
- Idriss, & Boulanger. (2008). *SOIL LIQUEFACTION DURING EARTHQUAKES*. Oakland, CA: EERI.
- Idriss, I. M. (1999). *An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction (pp. FHWA-RD-99-165). Federal Highway Administration.*
- Iwasaki, T., & Tatsuoka, F. (1977). *EFFECTS OF GRAIN SIZE AND GRADING ON DYNAMIC SHEAR MODULI OF SANDS. Soil Foundations*, 19-35.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., & Yasuda, S. (1978). *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. The 2nd International Conference on Microzonation, (pp. 885-896). San Francisco, CA.*
- Kayen, R., Moss, R., Thompson, E. M., Seed, R. B., Cetin, K. O., Der Kiureghian, A., . . . Tokimatsu, K. (2013). *Shear-Wave Velocity–Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 407- 419.
- Liao, S. S., & Whitman, R. V. (1986). *Overburden Correction Factors for SPT in Sands. Journal of Geotechnical Engineering Vol.112 ASCE.*

- Louie, J. N. (2001). *Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 347-364.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd Edition. Hoboken: John Wiley and Sons.
- NEC. (2015). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN-PELIGRO SÍSMICO-DISEÑO SISMO RESISTENTE*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. *GEOPHYSICS*, 800-808.
- Robertson, P. K. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. *Canadian Geotechnical Journal* 27(1), 360-71.
- Robertson, P. K. (2008, Enero 01). *Transitions Zones in CPT Data*. Retrieved from CPT-Robertson: <http://www.cpt-robertson.com/blog/2008/01/01/x9PC8vaUBPrLALOjfx0cDYLFycOQOb/transition-zones-in-cpt-data>
- Robertson, P. K., & Wride, C. (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetretation test*. *Canadian Geotechnical Journal*, 442-59.
- Sedd, H. B., & Idriss, I. M. (1967). *Analysis of soil liquefaction: Nigata Earthquake*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). *A SIMPLIFIED PROCEDURE FOR EVALUATING SOIL LIQUEFACTION POTENTIAL*. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE* 97 (SM9), 1249-273.
- Shannon and Wilson Inc. (1964). *Report on Anchorage Area Soil Studies, Alaska to U.S. Engineer District, Anchorage Alaska 28 August 1964*. Seattle.
- Suzuki, Y., Sanematzu, T., & Tokimatsu, K. (1998). "Correlation between SPT and seismic CPT.". *Conference on Geotechnical Site Characterization*, (pp. 1375 - 380). Rotterdam.
- The National Academies of Science, Engineering, Medicine. (2016). *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. Washington, DC.: The National Academy Press.
- Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. (2002). *Estimating liquefaction Ground Settlements para el CPT*. *Canadian Geotechnical Journal*, 1168 - 1180.

9. ANEXOS

ANEXO 1: PERFORACIONES SPT



NYLIC INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO													SONDEO N° P 7						
OBRA:		PUERTO MOCOLI													HOJA N° 1 de 3						
LOCALIZACION:		SECTOR DE LOS EDIFICIOS													FECHA: Septiembre - 2012						
Coordenadas: 9°768,482 N - 627,439 E		COTA: +2.81													NF: 2.10 m						
MUES. TRA. N°	PROFUND. (m)	DESCRIPCION	ESTRATI GRAFIA	SUCS	W %	LW %	IP %	γm T/m3	γd T/m3	ε %	Torc. T/m²	Pu T/m²	N°4 %	N°200 %	N	N ₆₀	HUMEDADES				
	0.00 - 1.10	Relleno: grava de 50 cm con arena y finos limosos																			
1	1.50 - 2.00			MH	71	95	45	1.551	5.51	11.89	2.20	5.75	100	99							
2	3.00 - 3.50	Limo arcilloso gris verdoso con finos de arena fina		MH	64	58	26	1.569	2.66	9.72	1.50	2.88	100	97							
3	4.50 - 5.00			MH	94	118	63	1.449	4.59	9.20	2.10	5.00	100	82							
4	6.00 - 6.50			SM	66		N-P						100	37							
5	7.55 - 8.00	Atena limosa gris verdosa		SP-SM	43		N-P						100	10	9	6					
6	9.05 - 9.50	Limo arcilloso con espigas de arena fina gris verdoso		MH	67	59	23						100	78	1	1					
7	10.55 - 11.00	Atena limosa gris verdosa		SM	33		N-P						100	24	5	4					
8	12.05 - 12.50	Limo arcilloso con espigas de arena fina gris verdoso		ML	60	48	17						100	80	1	1					
9	13.55 - 14.00	Atena limosa gris verdosa		SM	31		N-P						100	18	20	15					
10	15.05 - 15.50			MH	107	127	57						100	97	1	1					
11	16.50 - 17.00	Limo arcilloso café claro con finos orgánicos		MH	90	111	50	1.425	10.19	10.28	4.25	9.75	100	100							
		CAMBIO 17.45																			
12	18.00 - 18.50	Turba café oscura		Pt	275	387	193	No se recuperó suficiente muestra										100	26		
		CAMBIO 18.15																			
13	19.55 - 20.00	Limo arcilloso verdoso grumoso		MH	34	52	19						100	88	24	18					

Emite y aprueba: Jefe de Laboratorio



RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

SONDEO N° P 7

PUERTO MOCOLI

HOJA N° 2 de 3

OBRAS:

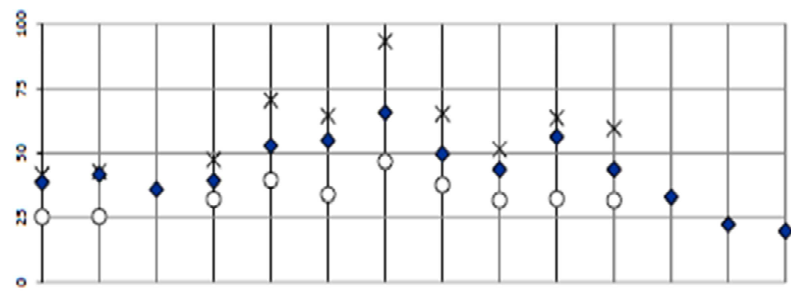
LOCALIZACION: SECTOR DE LOS EDIFICIOS

FECHA: Septiembre - 2012


Coordenadas: 9°768,482 N - 627,439 E

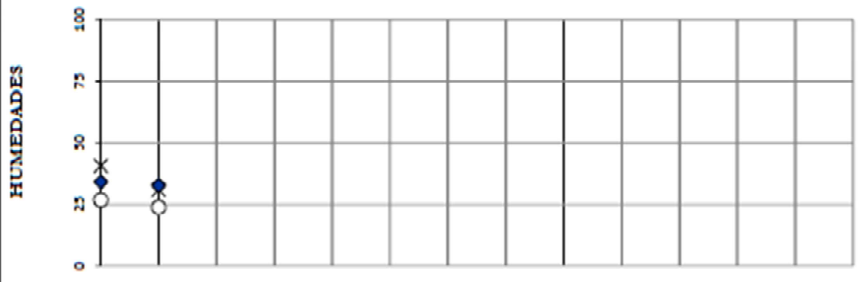
HUMEDADES

MUES-TRA N°	PROFUND. (m)	DESCRIPCION	ESTRATI-GRAFIA	SUCS	W %	LW %	IP %	Y m T/m3	qa T/m²	ε %	Tovc. T/m²	Po T/m²	N°4 %	N°200 %	N	N ₆₀
14	21,05 - 21,50	Arcilla limosa verdosa		CL	39	42	16						100	73	36	27
15	22,55 - 23,00			SC	42	43	17						100	43	39	29
16	24,05 - 24,25	Arena limosa arcillosa gris verdosa		SM	36		N-P						100	16	11/8"	17
16'	24,25 - 24,50			SM	39	47	15						100	49	14/8"	21
17	25,55 - 26,00	Limo arcilloso amarilla verdosa		MH	53	71	31						100	99	16	12
18	27,05 - 27,50	grumosa		MH	55	65	31						100	97	19	14
19	28,55 - 29,00			MH	66	93	47						100	98	18	14
20	30,05 - 30,50			MH	50	65	28						100	66	35	26
21	31,55 - 32,00	Limo arcilloso verdoso con punta café		MH	44	52	20						100	77	93	70
22	33,05 - 33,50			MH	56	64	31						100	95	37	28
23	34,55 - 35,00			MH	44	60	28						100	75	81	61
24	36,05 - 36,50			SM	33		N-P						100	44	40	30
25	37,55 - 38,00	Arena limosa café		SM	22		N-P						100	21	118	89
26	39,05 - 39,20			SM	20		N-P						96	19	88/6"	132



Emite y aprueba: _____ Jefe de Laboratorio

 NYLIC NUBUES Y LUQUE INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO PUERTO MOCOLI														SONDEO N° P 7													
OBRA: LOCALIZACION:		SECTOR DE LOS EDIFICIOS Coordinadas: 9'765,482 N - 627,439 E														HOJA N° 3 de 3 FECHA: Septiembre - 2012													
DESCRIPCION		ESTRATI GRAFIA		SUCS		W		LW		IP		Ym		qa		ε		Toev.		Vm		N° 4		NF:					
PROFUND. (m)	DESCRIPCION	ESTRATI	GRAFIA	SUCS	W	LW	IP	Ym	qa	ε	Toev.	Vm	N° 4	N° 200	N	N₆₀	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
27	Cambio en la 40,55 - 41,00 Lomo arena: café claro			ML	34	41	14						100	70	37	28													
28	42,05 - 42,50 Arena limosa café claro			SM	33	31	7						100	42	40	30													
	FIN PERFORACION																												

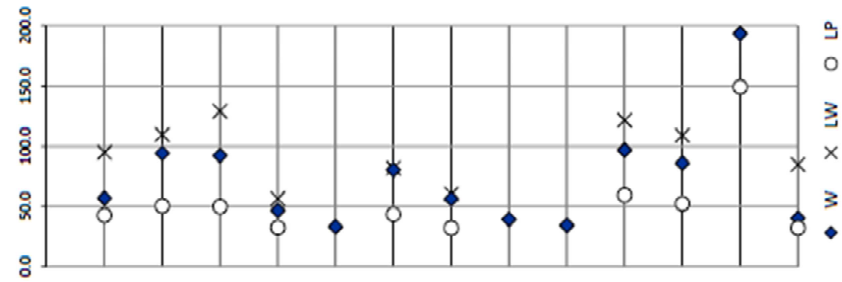


Emita y aprueba: _____
 Jefe de Laboratorio

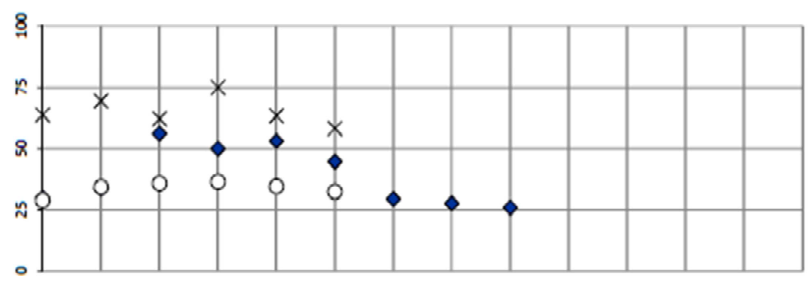
NYLIC INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO												SONDEO N° P 9					
OBRA:		PUERTO MOCOLI												HOJA N° 1 de 2					
LOCALIZACION:		SECTOR DE LOS EDIFICIOS												FECHA: Octubre - 2012					
Coordenadas 9768,523.00 n - 627,420.00 E		COTA: +2.835												HUMEDADES					
MUES- TRA N°	PROFUND. (m)	DESCRIPCION	ESTRATI GRAFIA	SUCS	W %	LW %	IP %	γ_m T/m ³	γ_m T/m ³	γ_m T/m ³	γ_m T/m ³	γ_m T/m ³	γ_m T/m ³	Pa T/m ²	N° 4 %	N° 200 %	N	N ₉₀	
	0,00 - 1,60	Relleno: grava de 50 cm con arena y finos limosos																	
1	1,60 - 2,10			MFH	57	95	52	1.673	9.54	8.09	4.80	9.00	100	100					
2	3,00 - 3,50	Limo arcilloso color gris verdoso con leantas de arena fina y guijas orgánicas		MFH	94	110	59	1.455	4.65	12.44	1.80	5.00	100	98					
3	4,50 - 5,00			MFH	92	129	79	1.471	4.30	8.09	2.10	4.50	100	81					
4	6,00 - 6,50			MFH	46	56	24	1.653	2.66	8.09	1.20	3.00	100	70					
5	7,55 - 8,00	Arena limosa color gris verdoso de compactación suelta		SP-SM	33		N-P						100	9	9	6			
6	9,05 - 9,50			MFH	60	82	38						100	72	3	2			
7	10,35 - 11,00	Limo arcilloso color gris verdoso con capilar de arena fina. Compactación blanda		MFH	56	60	28						100	82	1	1			
8	12,05 - 12,50			SM	39		N-P						100	22	6	5			
9	13,55 - 14,00	Arena limosa color gris verdoso de compactación suelta a medio densa		SM	34		N-P						100	22	17	13			
10	15,05 - 15,50			MFH	97	122	62						100	98	3	2			
11	16,50 - 17,00	Limo arcilloso color gris verdoso con capilar de arena fina y materia orgánica		MFH	86	109	57	1.427	8.65	6.47	4.60	7.13	100	99					
12	18,00 - 18,50	Turba café oscuro		Pt	193	339	190					30.60	100	40					
13	19,50 - 20,00	Arenilla limosa color verdoso		CH	40	85	53	1.825	12.95	4.32	6.25	11.15	100	95					

Emite y aprueba:

Jefe de Laboratorio

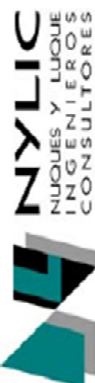


NYLIC INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO												SONDEON° P 9		
OBRA: PUERIO MOCOLI		SECTOR DE LOS EDIFICIOS												HOJA N° 2 de 2		
LOCALIZACION: Coordenadas 9°768,523.00 n - 627,420.00 E		COTA: +2.835												FECHA: Octubre - 2012		
MUES- TRAN°	PROFUND. (m.)	DESCRIPCION	ESTRATI GRAFIA	SUGS	W %	LW %	IP %	γ _m T/m ³	q _u T/m ²	ε %	T _{rec.} T/m ²	Pa T/m ²	N° 4 %	N° 200 %	N	N ₆₀
14	21,05 - 21,50	Areilla limosa color verdosa, dura		CH	30	64	35						100	96	49	37
15	22,55 - 23,00	Limo arcilloso color verdoso, de consistencia dura		MH	34	69	35						100	83	38	29
16	24,05 - 24,50			MH	56	62	26						100	91	19	14
17	25,55 - 26,00	Limo arcilloso color amarillo verdoso, granuloso, de consistencia muy firme		MH	50	75	38						100	89	28	21
18	27,05 - 27,50			MH	53	63	29						100	93	22	17
19	28,55 - 29,00			MH	45	58	26						100	52	40	30
20	30,05 - 30,50			SM	29		N-P						100	13	74	56
21	31,55 - 32,00	Areana limosa color café, muy densa		SM	28		N-P						100	23	100	75
22	33,05 - 33,50			SP-SM	26		N-P						100	9	108	81
		FIN PERFORACION														




◆ W X LW ○ LP

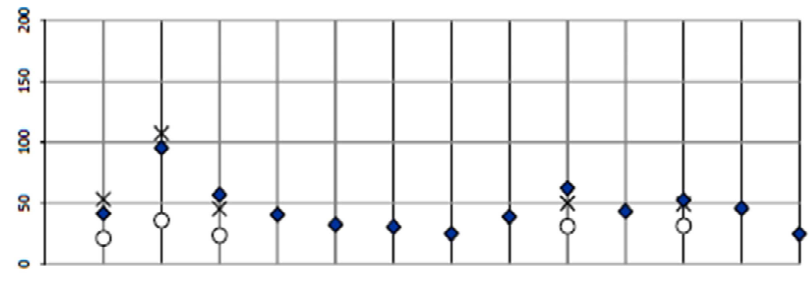
Emite y aprueba: _____ Jefe de Laboratorio

 NYLIC NIQUES Y LLOQUE INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO PUERTO MOCOLI												SONDEON° P 10
OBRA: LOCALIZACION: 9°768,555,09 N - 627,451,03 E		SECTOR EDIFICIOS										HOJA N° 1 de 2	FECHA: Noviembre - 2012	
DESCRIPCION		COTA: +3.85										NF: 2.00 m		
MUES- TRAN°	PROFUND. (m)	SUCS	W %	LW %	IP %	γ _m T/m ³	γ _{sat} T/m ³	e %	Tom. T/m ²	Pa T/m ²	N° 4 %	N° 200 %	N N ₆₀	
ESTRATI- GRAFIA		HUMEDADES												
1	0,00 - 1,50	MH	88	112	59	1.431	1.36	6.98	1.10	1.51	100	98		
2	1,50 - 2,00	SC	44	41	17				0.74	1.56	100	36		
3	3,00 - 3,50	MH	93	105	57						100	79		
3'	4,65 - 5,00	SM	33		N-P						100	14		
4	6,05 - 6,50	SP	25		N-P						100	4	11 7	
5	7,55 - 8,00	SP-SM	33		N-P						100	9	16 11	
6	9,05 - 9,50	CH	57	75	41						100	61	5 4	
7	10,55 - 11,00	MH	58	56	24						100	84	4 3	
8	12,05 - 12,50	SM	55	52	22						100	49	11 8	
9	13,55 - 14,00	SC	37	35	13						100	29	19 14	
10	15,05 - 15,50	SM											6 5	
11	16,50 - 17,00	MH	89	114	58	1.461	3.82	2.70	2.60	4.50	100	99		
12	18,00 - 18,50	MH	82	107	51	1.478	9.91	5.96	2.80	5.63	100	99		
13	19,50 - 20,00	Pt	282	397	181				3.70	5.38	100	29		

Emite y aprueba:

Jefe de Laboratorio

 NYLIC NIQUES Y LUQUE INGENIEROS CONSULTORES		RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO SONDEO N° S12 HOJA N° 1 de 2 FECHA: Enero 2014														
LOCALIZACION: 9°7'68,475.87 N - 627,429,89 E CPT 1 PUERTO MOCOLI EDIFICIO C-5000 COTA: +4.131 NF: 3.25 m																
MUES- TRA N°	PROFUND. (m.)	DESCRIPCION	ESTRATI GRAFIA	SUCS	W %	LW %	IP %	γ _m T/m ³	q _s T/m ²	ϕ %	Tom: T/m ²	Pu T/m ²	N° 4 %	N° 200 %	N	N ₆₀
		Se ejecuta el sondeo mediante barro hasta 5.55 m de profundidad														
1	5.55 - 5.70	Arena fina arcillosa color gris resaca de compacidad suelta		SC	42	53	32						100	32	1	1
1'	5.70 - 6.00	Arcilla limosa color gris verdosa de consistencia blanda		CH	95	107	72						100	97	2	1
2	6.05 - 7.30			SC	57	45	22						100	44	4	3
3	7.35 - 7.80			SM	41		NP						100	23	12	9
4	7.85 - 8.30	Arena fina con pequeñas capitas de arcilla, color gris verdosa de compacidad suelta a medio densa		SP-SM	32		NP						100	8	8	6
5	8.35 - 8.80			SM	31		NP						100	16	16	11
6	8.85 - 9.30			SM	25		NP						100	29	19	14
7	9.35 - 9.50			SM	39		NP						100	28	2	2
7'	9.50 - 9.80	Limo arcilloso con lentes de arena gris verdoso de consistencia blanda		ML	62	50	19						100	92	2	2
8	11.75 - 11.90	Arena limosa color gris verdosa de compacidad medio densa		SM	43		NP						100	34	10	8
8'	11.90 - 12.20	Limo arenoso color gris verdoso de consistencia firme		ML	53	49	18						100	77	14	11
9	13.75 - 14.20			ML	46		NP						100	51	14	11
10	14.75 - 14.90	Arena fina gris verdosa, suelta		SP-SM	25		NP						100	9	8	6



◆ W X LW ○ LP

Emite y aprueba: _____
 Jefe de Laboratorio

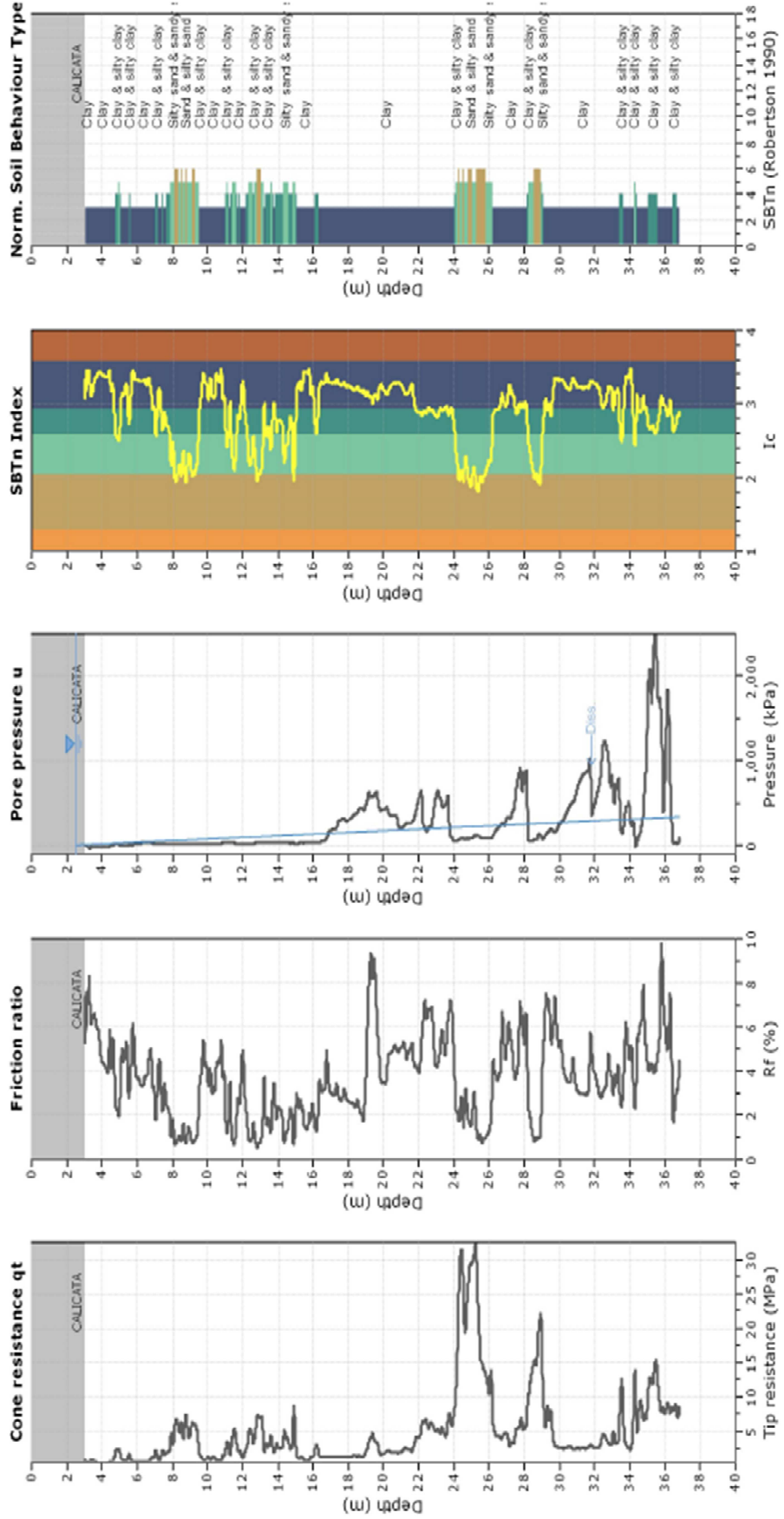
ANEXO 2: PERFORACIONES CPT

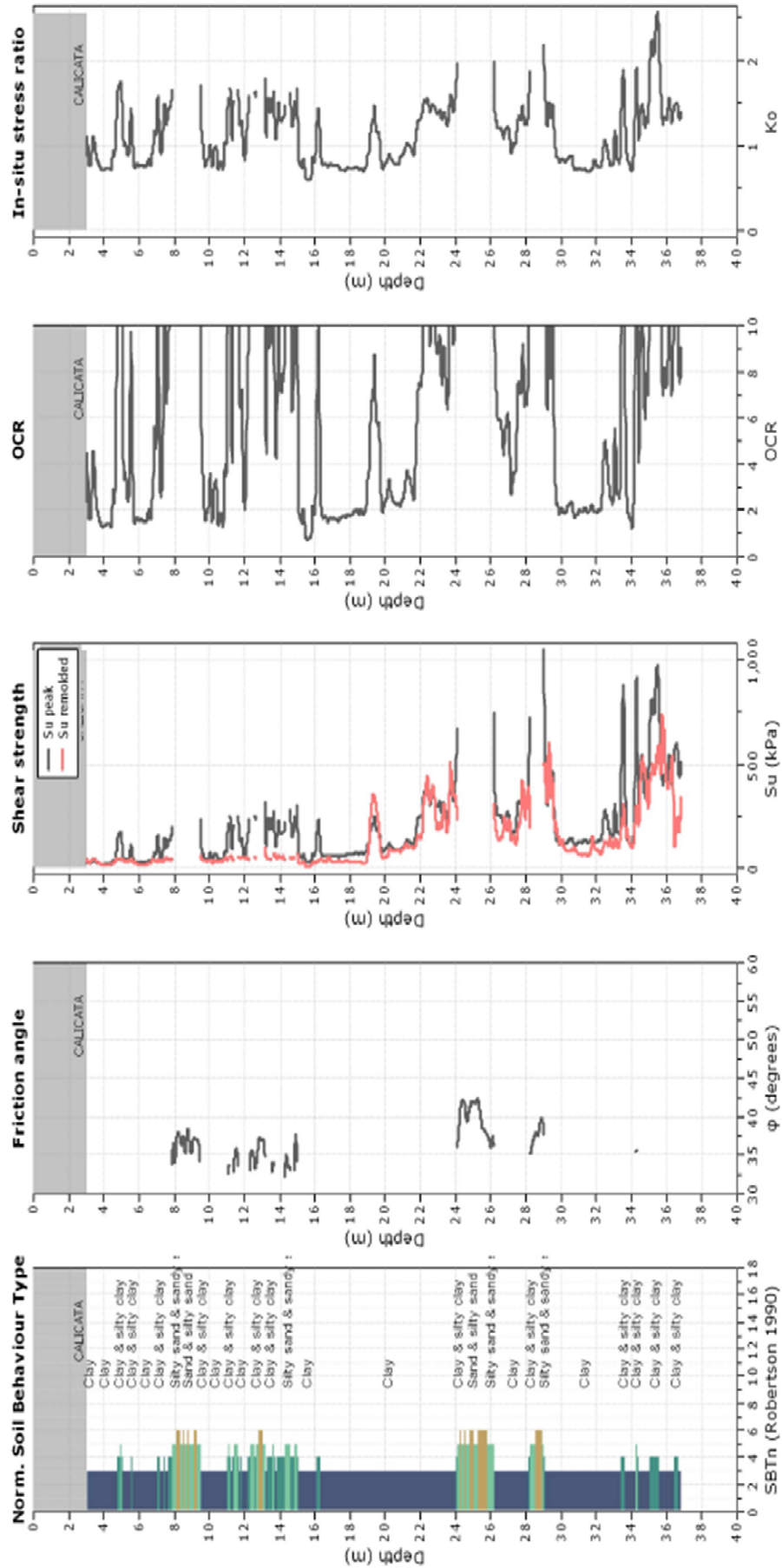


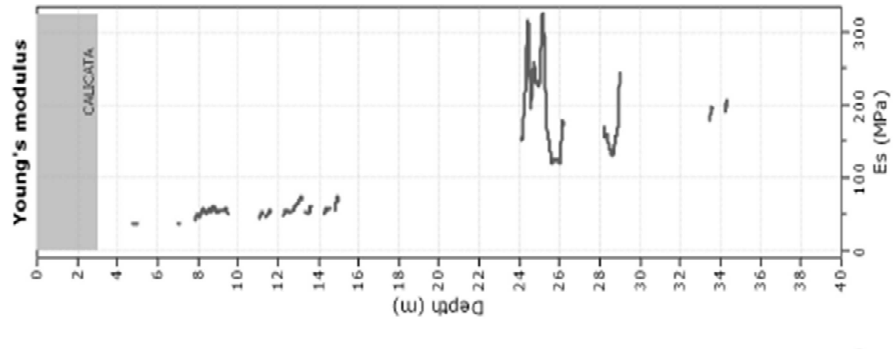
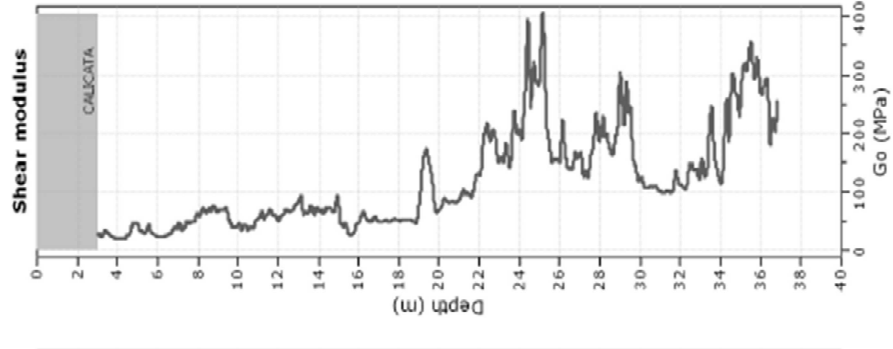
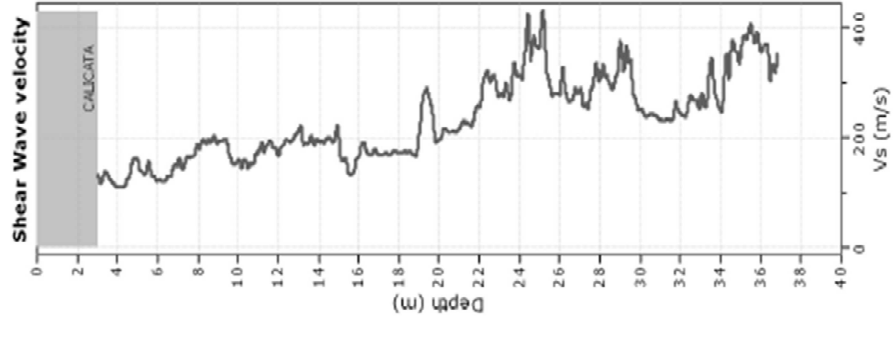
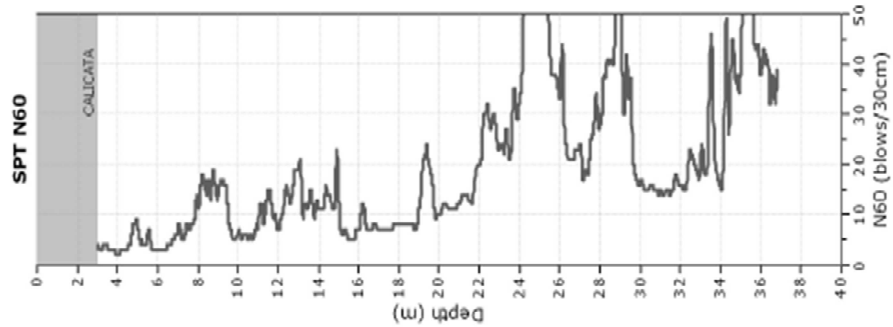
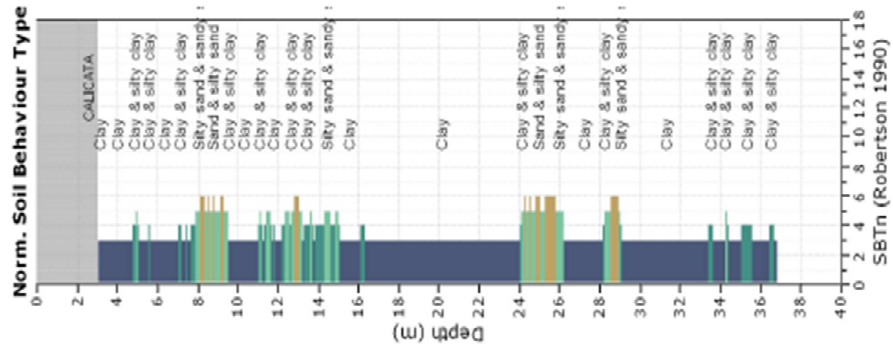
TECNAC S.A.
 Fernando Illingworth, MSCE
 f.illingworth@tecnac.com
 www.tecnac.com

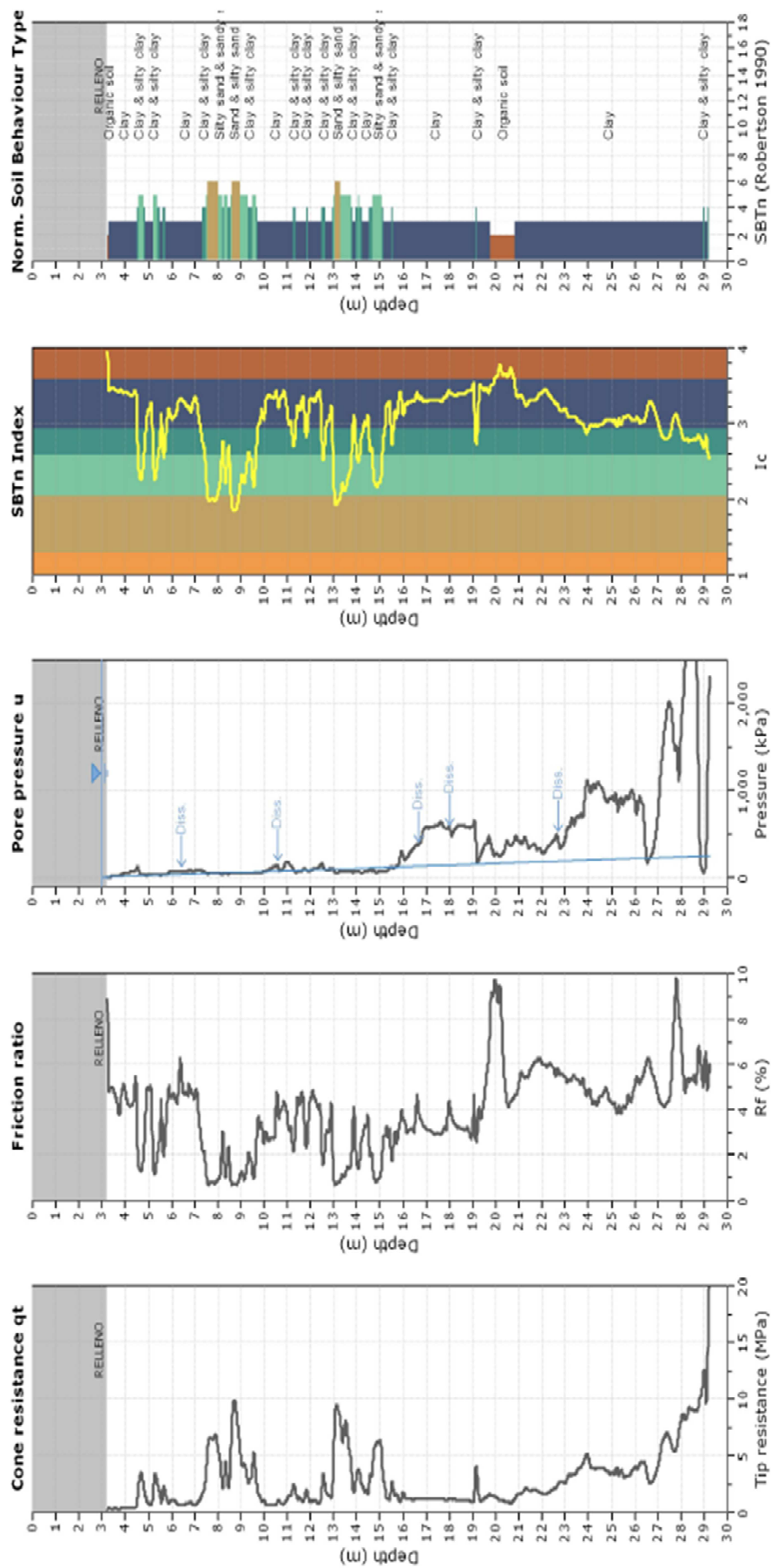
Project: Puerto Mocoli
 Location: Isla Mocoli

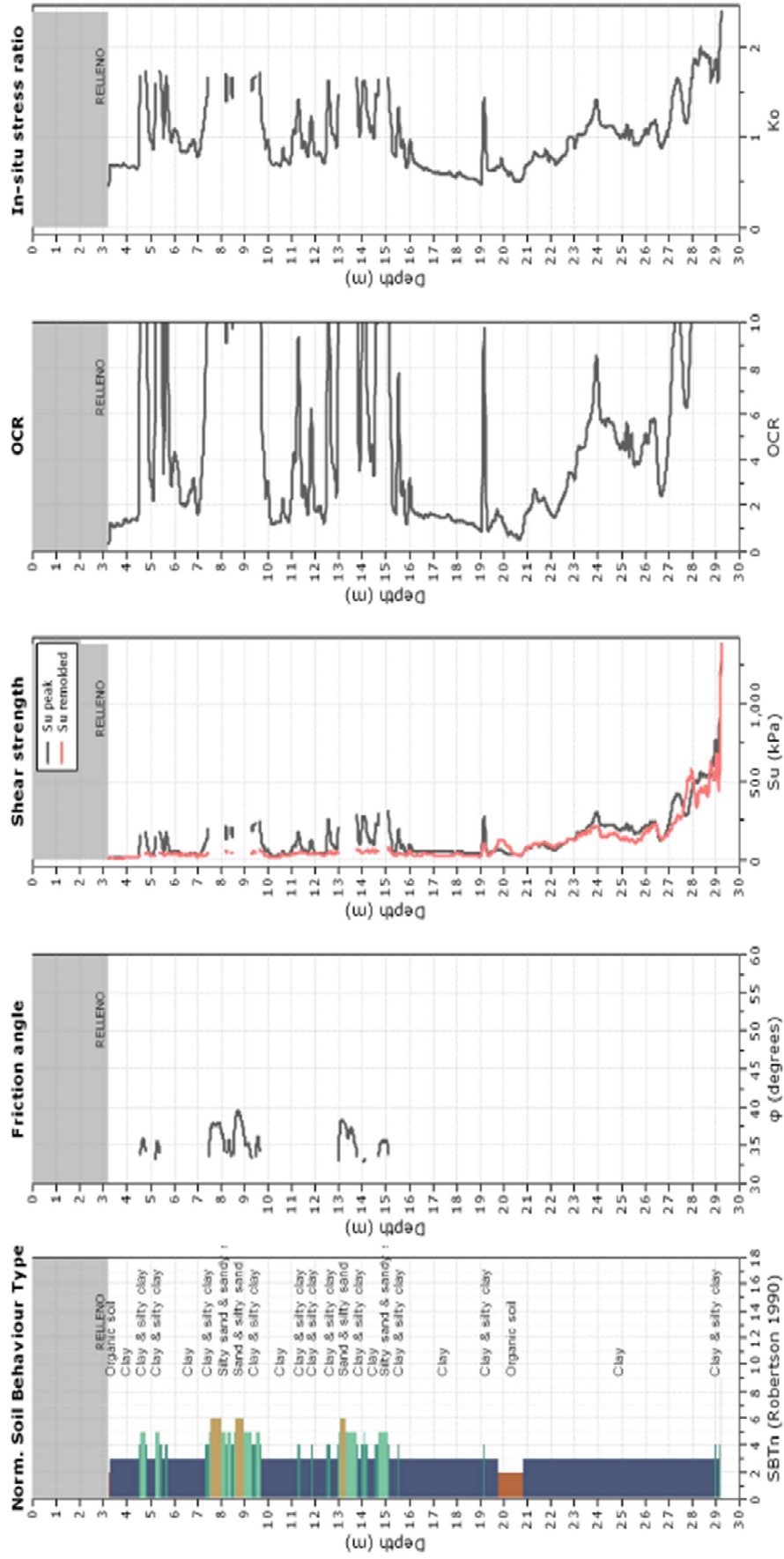
CPT: CPT-1
 Total depth: 36.83 m, Date: 06/01/2014
 Surface Elevation: 4.50 m
 Cone Type: TK326

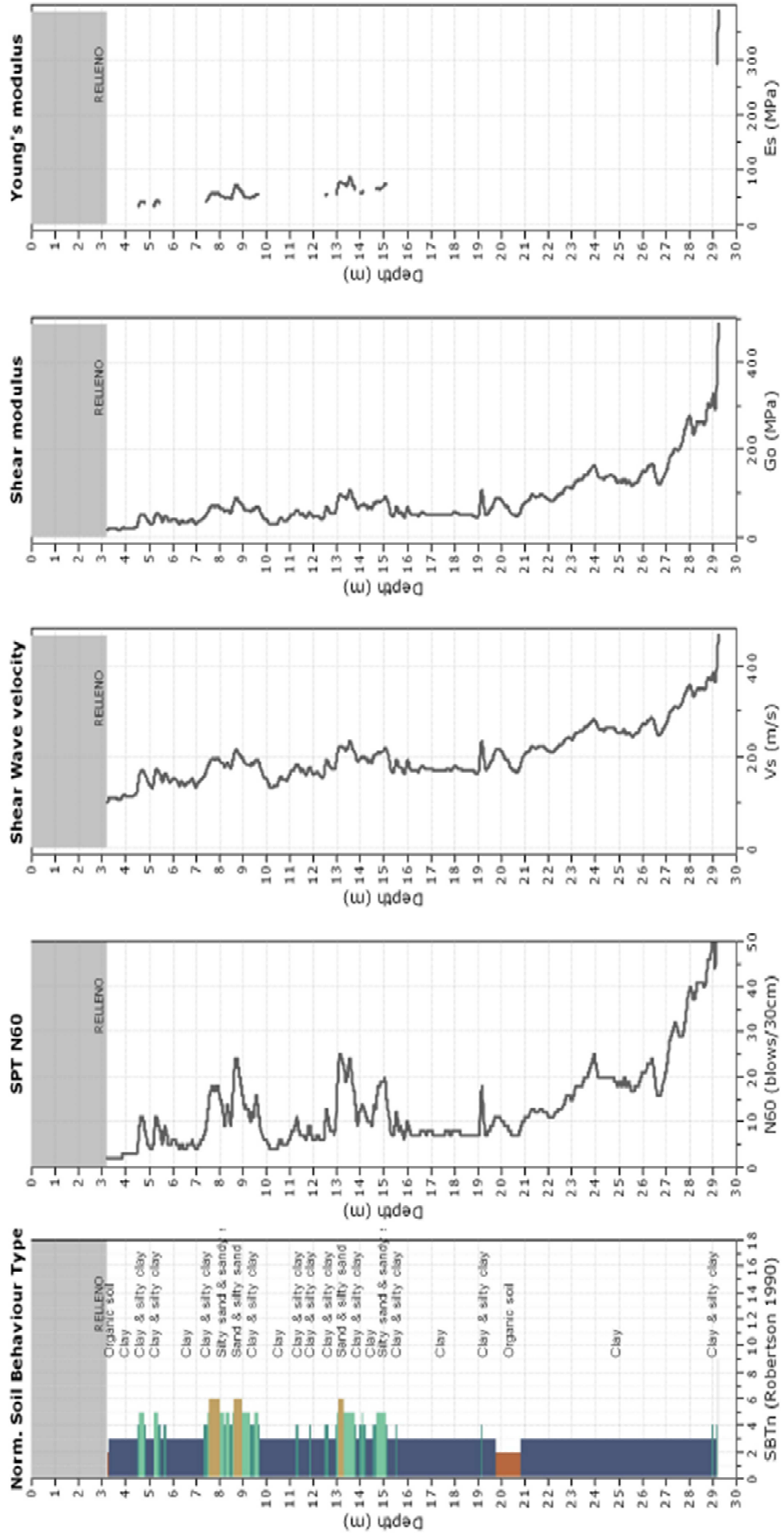


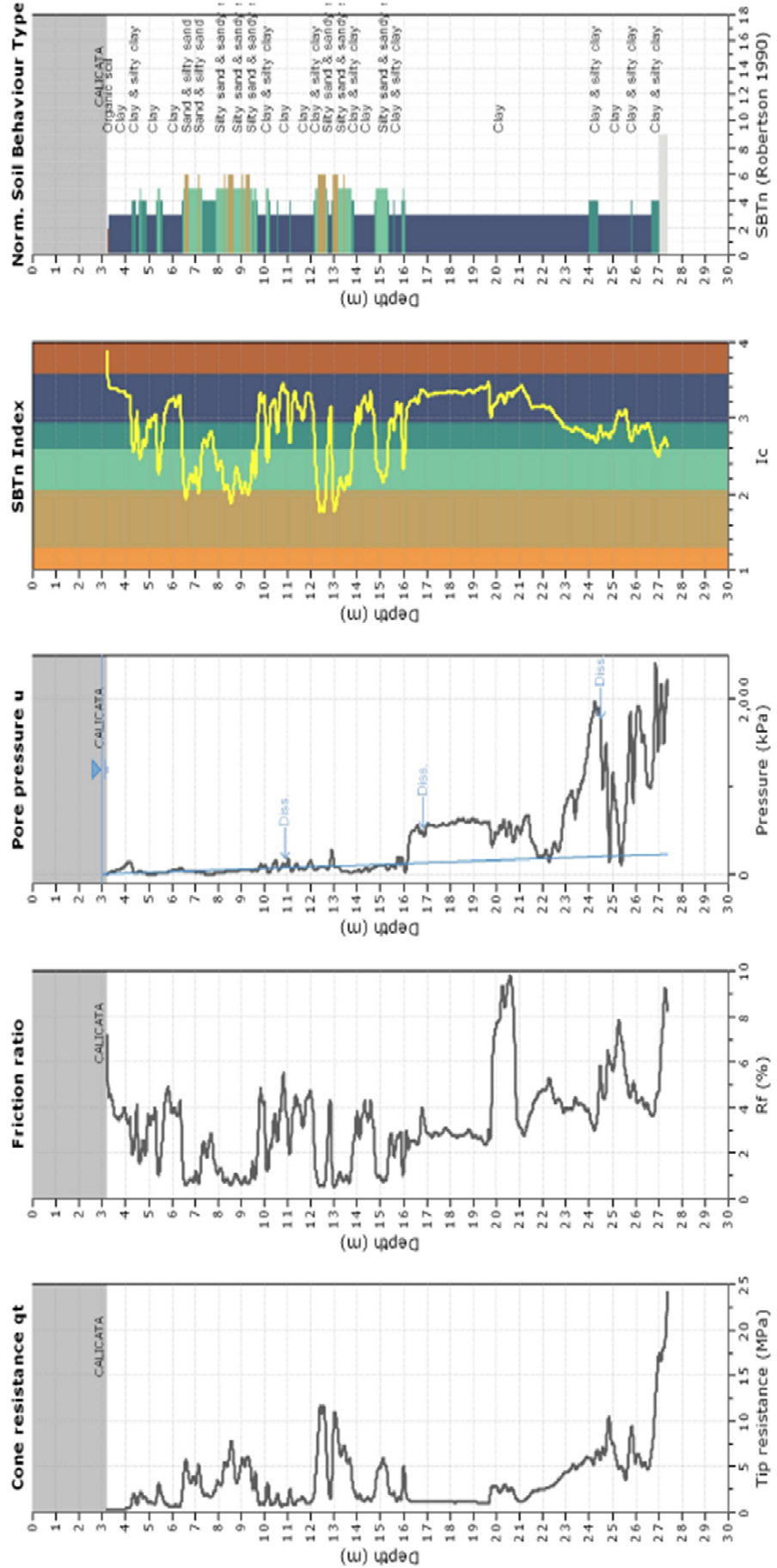


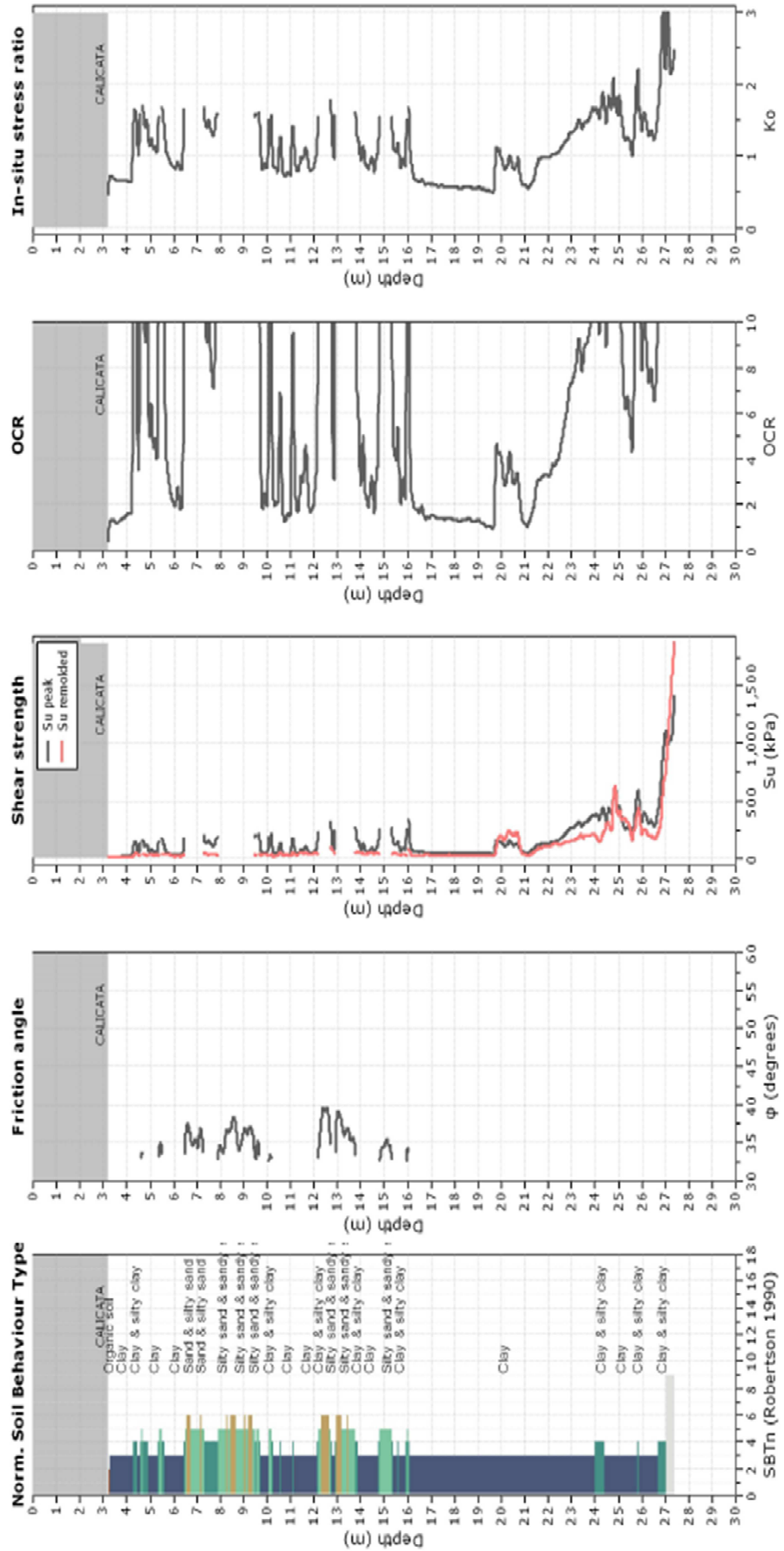


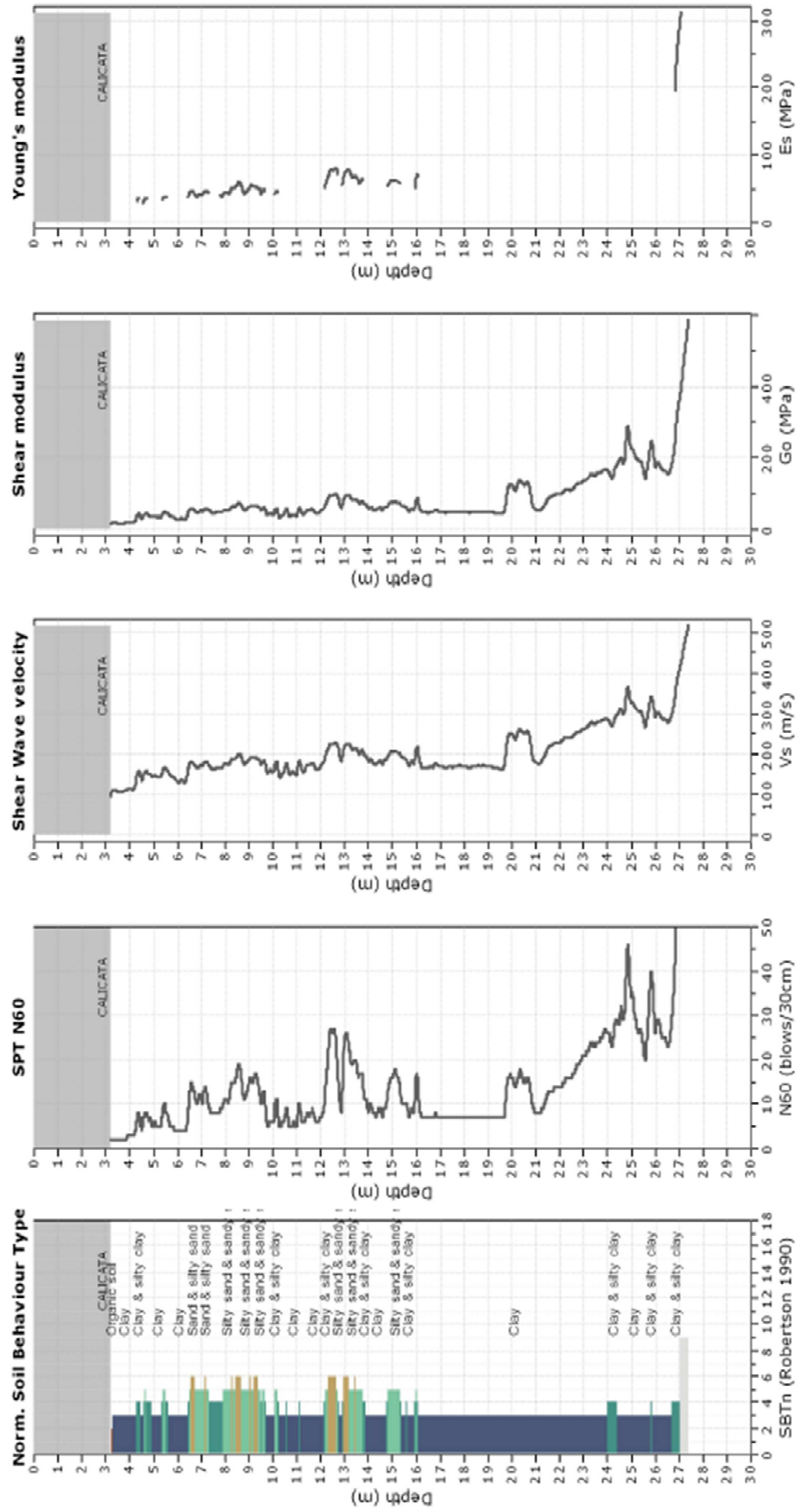


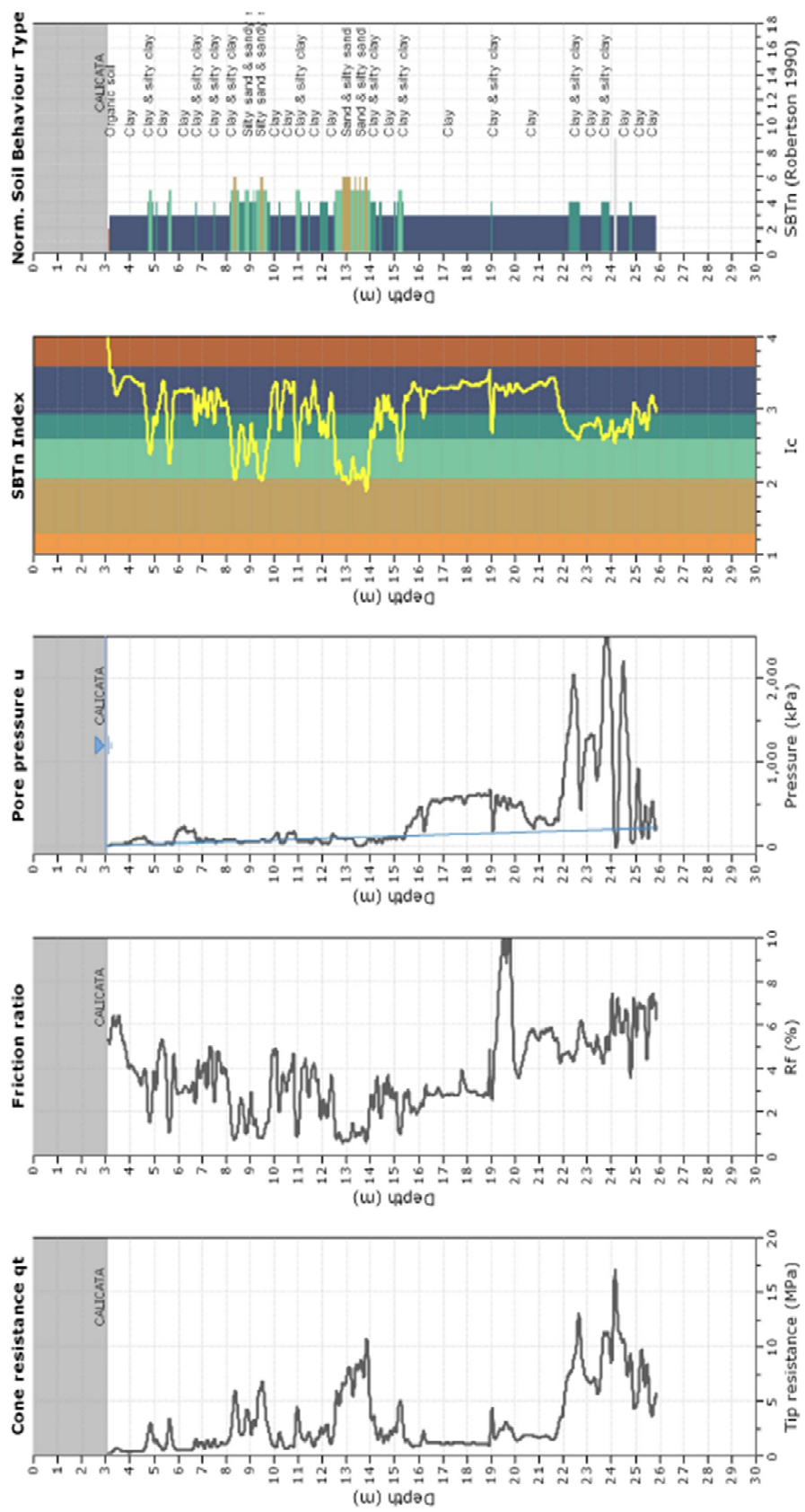


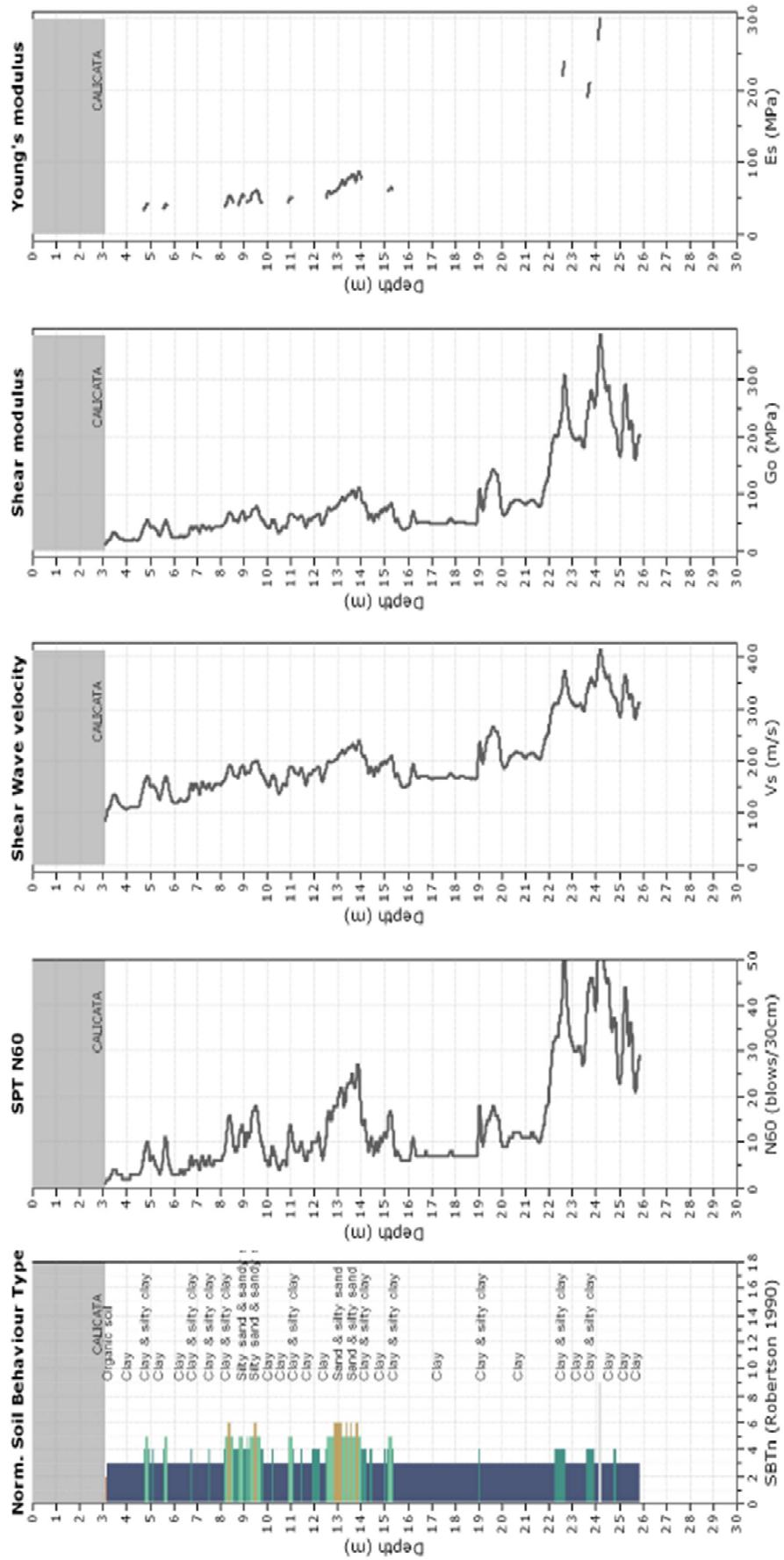


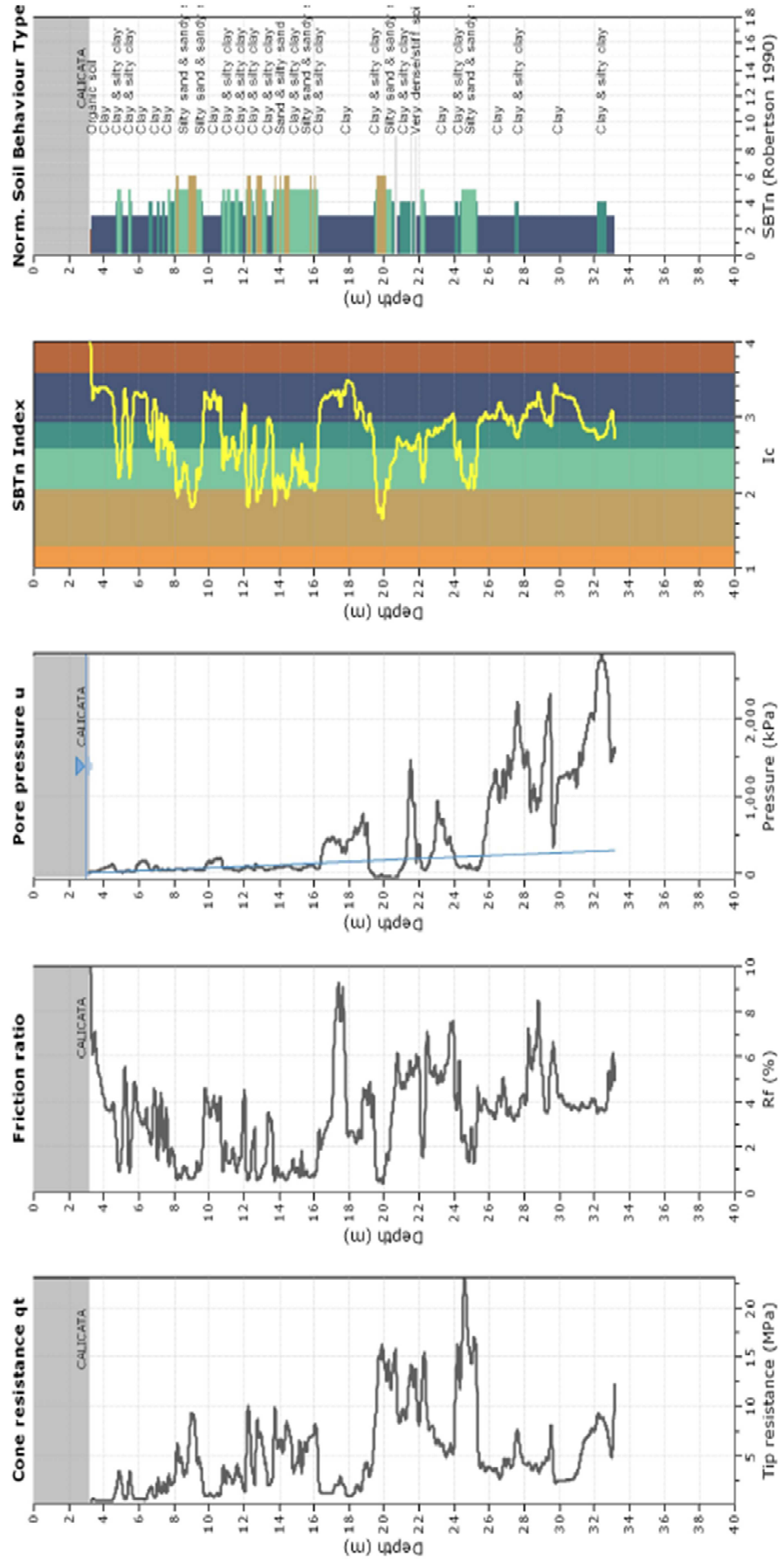


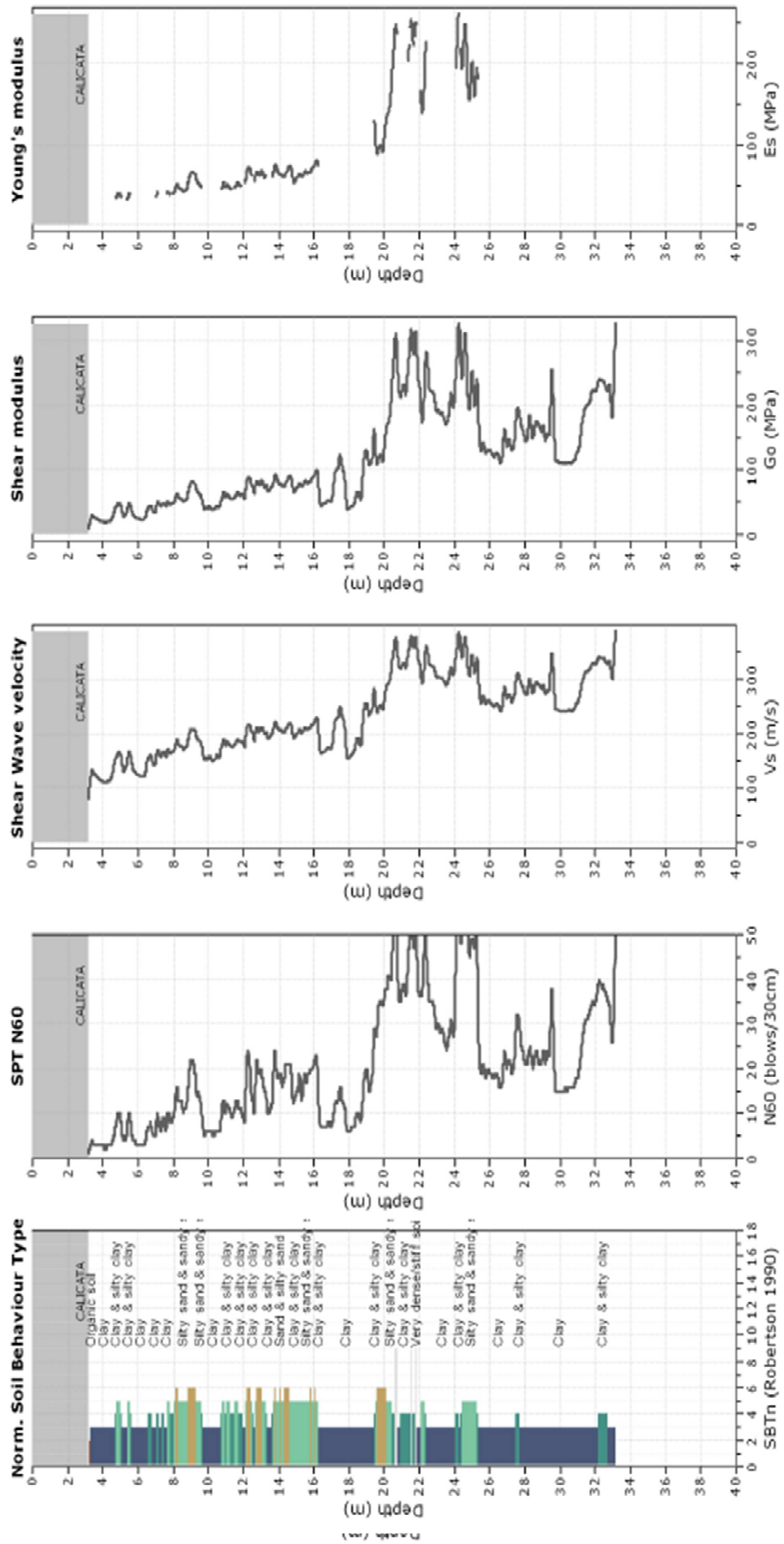






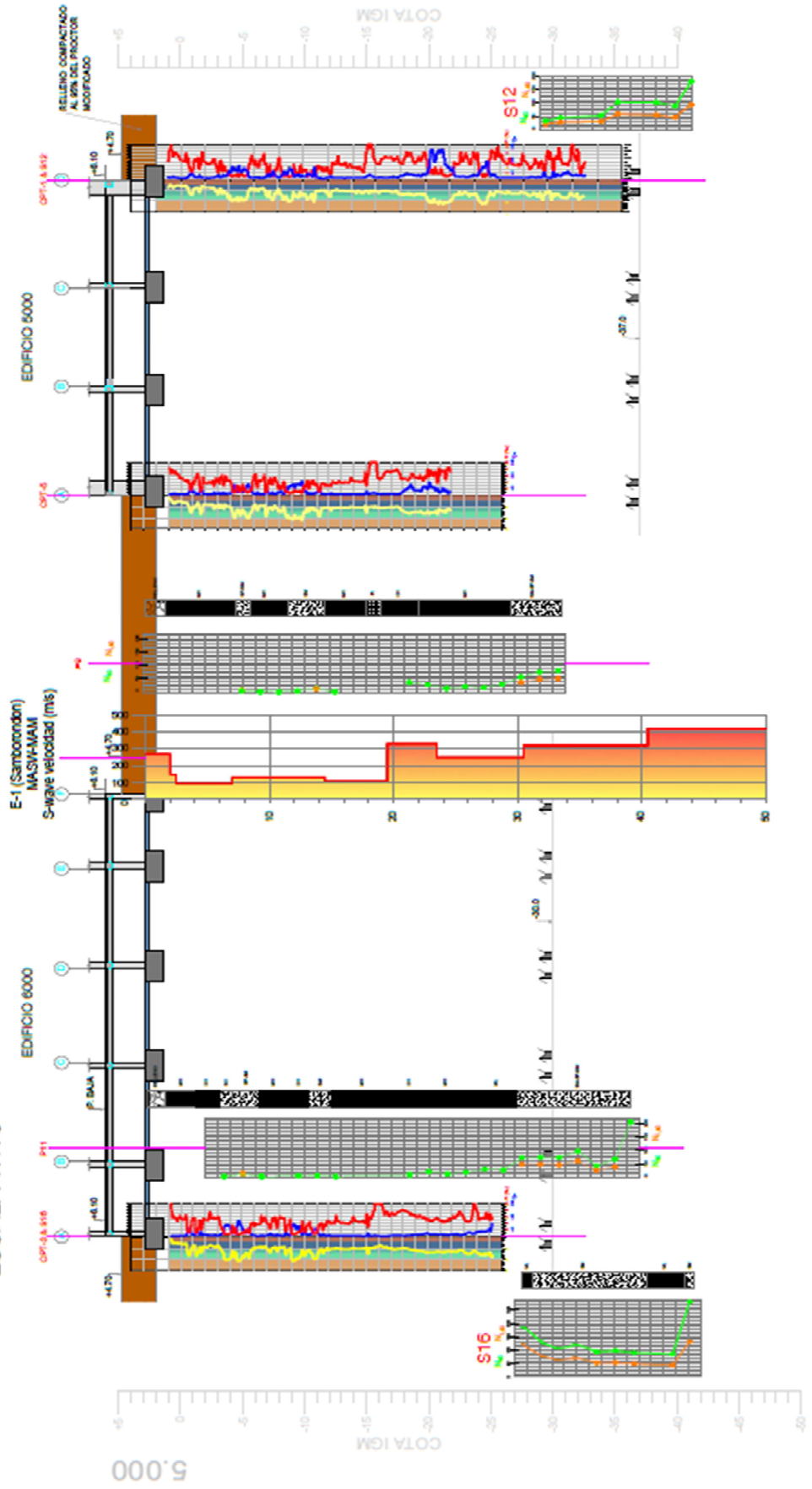






ANEXO 3: PERFIL GEOTÉCNICO

CORTE 1-1'
ESCALA 1:175



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Murillo Roldós, Fabrizio José**, con C.C: #0920185196 autor del trabajo de titulación: Evaluación Y Comparación Del Factor De Seguridad Contra La Licuación Para Un Proyecto De La Isla Mocolí Ubicado En El Cantón Samborondón, Utilizando Metodologías Para Ensayos De Penetración Estándar (SPT), Ensayo De Penetración De Cono (CPT) Y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW Para Determinar Ondas De Corte (Vs) previo a la obtención del título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 9 de marzo del 2018

f. _____

Nombre: **Murillo Roldós, Fabrizio José**

C.C: **0920185196**



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Evaluación Y Comparación Del Factor De Seguridad Contra La Licuación Para Un Proyecto De La Isla Mocolí Ubicado En El Cantón Samborondón, Utilizando Metodologías Para Ensayos De Penetración Estándar (SPT), Ensayo De Penetración De Cono (CPT) Y Pruebas Geofísicas MAM Y MASW Para Determinar Ondas De Corte (Vs)		
AUTOR(ES)	Murillo Roldós, Fabrizio José		
REVISOR/TUTOR	Caicedo Aspiazu, Adolfo Carlos		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	9 de Marzo del 2018	No. DE PÁGINAS:	116
ÁREAS TEMÁTICAS:	Geotécnia, Ingeniería Sísmica, Prospección Geofísica		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	VS; SPT; CPT; LICUACIÓN; FS; LPI; ASENTAMIENTOS VERTICALES.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>Ecuador al ser un país con riesgo sísmico alto está expuesto a terremotos de gran magnitud. Uno de los problemas geotécnicos más grandes causados por los sismos es el de la licuación de las arenas saturadas, debido a que causan daños severos en las estructuras, edificios, vías, etc. por estas razones es importante conocer si un suelo es susceptible a licuación y si ocurrirá para un sismo esperado. Actualmente existen varias metodologías para evaluar el potencial de licuación de los estratos arenosos que están basadas en el método simplificado (Seed & Idriss, 1971). Este trabajo presentará los análisis de potencial de licuación para las metodologías SPT, CPT y Vs para un proyecto ubicado en la Isla Mocolí en el cantón Samborondón. Para evaluar la susceptibilidad de un estrato a licuarse para los ensayos SPT y VS se utilizaron las metodologías de Bray y Sancio (2006) y Boulanger e Idriss (2006), para los ensayos CPT se utilizó Boulanger e Idriss (2014) y se realizó correlaciones de I_c vs FC para encontrar el valor de CFC característico del sitio. Para este proyecto se realizó la evaluación potencial de licuación para los estratos granulares por 3 distintas metodologías: SPT (Boulanger & Idriss, 2014), CPT (Boulanger & Idriss, 2014) y Vs (Kayen et. Al., 2013) y se compararon y graficaron los valores de Factor de seguridad (FS), índice de potencial de licuación (LPI) y asentamientos verticales causados por licuación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR	Teléfono: +593-988011903	E-mail: fabrizio-murillo-r@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glas Cevallos		
	Teléfono: +593-4 -2206956		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			