



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN LA PTAR LAS
ESCLUSAS, GUASMO SUR-GUAYAQUIL”**

PROYECTO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentado por:

MARIA BELEN CORDERO PLACENCIA

MAITTE TORRE SOTOMAYOR

**GUAYAQUIL- ECUADOR
2018**

DEDICATORIA

El siguiente trabajo es dedicado a Dios por siempre guiar mi camino, a mis padres, hermanas, novio y mejores amigos por brindarme siempre ese apoyo incondicional para culminar esta meta.

María Belén Cordero Placencia

DEDICATORIA

A mis padres, María Elena y Freddy, por apoyarme y alentarme en todo momento, para culminar esta etapa de mi vida.

A Renato, mis hermanos, abuelos, tíos y Martín, por su desinteresada forma de afirmarme que podía lograrlo.

Maitté Torré Sotomayor

AGRADECIMIENTO

Porque todo aquel que pide, recibe; y el que busca, halla; al que llama, se le abrirá. (Lucas 11:10).

Agradezco a mi familia por ser mi símbolo de perseverancia, ayuda y enseñanzas. A nuestro Director de materia Integradora PhD. Miguel Ángel Chávez por su sabiduría, pasión y paciencia. Al Ing. Erwin Larreta, Ing. Kenny Escobar, a nuestro tutor Ing. David Stay, por su colaboración, enseñanzas y por transmitir sus conocimientos de manera desinteresada. A mis mejores amigos por su amistad y ayuda incondicional.

María Belén Cordero Placencia

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme culminar esta meta, a mi familia, amigos, a Hidalgo e Hidalgo y al Superintendente del proyecto PTAR Las Esclusas, el Ing. Pablo Guzmán, por permitirme usar la información de la obra, sobre todo al Ing. Alberto Hidalgo F. por su ayuda desinteresada. Un especial agradecimiento a nuestro Director de materia integradora, PhD. Miguel Ángel Chávez, por su guía y paciencia, al Ing. David Stay, por su incansable esfuerzo y por transmitirnos sus conocimientos de forma tan generosa. Finalmente agradezco a Belén por su infinita comprensión y ayuda.

Maitté Torré Sotomayor

TRIBUNAL DE PROYECTO

**Ph.D. Hugo Equez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

**Ph.D. Miguel Ángel Chávez Moncayo
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA**

**Ing. David Stay Coello
TUTOR DEL PROYECTO**

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

María Belén Cordero Placencia

Maitté Torre Sotomayor

RESUMEN

El presente proyecto Integrador comprende el análisis del potencial de licuefacción para el sector de Las Esclusas.

Se llevó a cabo mediante el estudio de las características geotécnicas del suelo, generando una base de datos analizada por el método de Seed (2004) donde se pudo apreciar los estratos susceptibles a licuarse, comparando los valores de Limite liquido vs Índice plástico.

Se determinó el Potencial de Licuefacción mediante el método propuesto por Boulanger e Idriss (2008) aplicando correlaciones y coeficientes para los datos obtenidos en los ensayos SPT y a las muestras seleccionadas en base a los criterios de Seed (2003). Obteniendo el factor de seguridad por licuefacción a través de la relación entre el esfuerzo cíclico (CSR) y la resistencia cíclica (CRR). Se elaboraron mapas de zonificación, tanto para los valores de FSliq, como para los asentamientos post-licuefacción, pudiendo apreciar las zonas propensas a este fenómeno. Finalmente, se propusieron soluciones adaptables a la situación.

Palabras clave: Licuefacción, CRR, CSR, FSliq.

INDICE GENERAL

| | |
|----------------------------|-----------|
| DEDICATORIA | II |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| TRIBUNAL DE PROYECTO | VI |
| DECLARACIÓN EXPRESA | VII |
| RESUMEN | VIII |
| ABREVIATURAS | XIV |
| SIMBOLOGÍA | XV |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XVIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XXI |
| CAPITULO 1..... | 23 |
| INTRODUCCIÓN | 23 |
| 1.1 Preámbulo | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 1.2 Planteamiento del Problema..... | 26 |
| 1.3 Hipótesis..... | 26 |
| 1.4 Objetivos..... | 27 |
| 1.4.1 Objetivo General..... | 27 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos..... | 27 |
| 1.5 Metodología de Estudio..... | 28 |
| 1.6 Área de Estudio..... | 29 |
| 1.6.1 Ubicación del Proyecto..... | 29 |
| CAPITULO 2..... | 31 |
| ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS..... | 31 |
| 2.1 Caracterización Geológica..... | 32 |
| 2.2 Prospección Geotécnica de Campo..... | 37 |
| 2.2.1 Perforaciones Mecánicas..... | 38 |
| 2.3 Ensayos de Laboratorio..... | 48 |
| 2.3.1 Granulometría..... | 48 |
| 2.3.2 Contenido de Humedad..... | 48 |
| 2.3.3 Densidad Relativa..... | 49 |
| 2.3.4 Límites de Atterberg..... | 50 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.4 | Parámetros Geotécnicos | 50 |
| CAPITULO 3..... | | 52 |
| CARACTERIZACIÓN DE SUELOS LICUABLES | | 52 |
| 3.1 | Suelos Licuables..... | 53 |
| 3.2 | Perfiles Geotécnicos Analizados | 54 |
| 3.2.1 | Perfil A-A' | 54 |
| 3.2.2 | Perfil B-B' | 56 |
| 3.2.3 | Perfil C-C' | 58 |
| 3.3 | Análisis de las condiciones necesarias para licuefacción en el sector Las Esclusas | 63 |
| CAPITULO 4..... | | 67 |
| POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL SUBSUELO DE LAS ESCLUSAS | | 67 |
| 4.1 | Susceptibilidad de Licuefacción | 68 |
| 4.2 | Análisis Cuantitativo | 69 |
| 4.2.1 | Resistencia Cíclica (CRR) | 71 |
| 4.2.2 | Razón de Esfuerzo Cortante Cíclico | 72 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 4.2.3 | Índice de potencial de licuación (LPI)..... | 81 |
| 4.2.4 | Factor de seguridad a la licuefacción (FSliq) | 83 |
| 4.2.5 | Asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación unidimensional | 83 |
| 4.3 | Análisis de los resultados de licuefacción de suelos a través del ensayo SPT..... | 85 |
| 4.4 | Resumen de resultados global del estudio de licuación de suelos | 92 |
| | CAPITULO 5..... | 94 |
| | PRESENTACIÓN DE MAPAS DE LICUEFACCIÓN..... | 94 |
| 5.1 | Mapas de Potencial de Licuefacción | 95 |
| | CAPITULO 6..... | 107 |
| | CRITERIOS GENERALES PARA PROPUESTAS DE SOLUCIONES..... | 107 |
| 6.1 | Columnas de Grava..... | 108 |
| 6.2 | Reemplazo del material | 110 |
| 6.3 | Drenajes para sismos | 110 |
| 6.4 | Compactación dinámica | 112 |

| | |
|--|------------|
| 6.5 Vibro-compactación | 114 |
| 6.6 Inyección de cemento | 116 |
| 6.7 Cimentación Profunda | 117 |
| CAPITULO 7..... | 119 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 119 |
| CONCLUSIONES | 120 |
| RECOMENDACIONES..... | 124 |
| ANEXOS | |
| BIBLIOGRAFIA | |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| ASTM | Sociedad Americana de Ensayo de Materiales |
| CCC | Cordillera Chongón Colonche |
| CF | Contenido de Finos |
| CPT | Ensayo de Penetración de Cono |
| CRR | Coefficiente de resistencia cíclica |
| CRS | Coefficiente de esfuerzo cíclico |
| FSliq | Factor de seguridad por licuefacción |
| NEC | Norma Ecuatoriana de la Construcción |
| PGA | Máxima aceleración sísmica Esperada |
| PTAR | Planta de Tratamiento de Agua Residuales |
| SUCS | Sistema Unificado de Clasificación de Suelos |
| SPT | Ensayo de Penetración Estándar |
| Z | Profundidad |
| SBT | Tipo de comportamiento del suelo |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------------|--|
| A_c | Área proyectada del Cono |
| S_{v-1D} | Asentamiento vertical de re-consolidación |
| C_u | Coficiente de Uniformidad |
| C_N | Factor de corrección por presión de Confinamiento |
| K_σ | Factor de corrección por Esfuerzo de sobrecarga vertical |
| r_d | Factor de reducción del Esfuerzo Cortante |
| L_I | Límite Líquido |
| L_p | Límite Plástico |
| L_{PI} | Índice de Potencial de Licuefacción |
| L_c | Límite de contracción |
| IP | Índice Plástico |

| | |
|------------|--|
| IL | Índice de Liquidez |
| Ic | Índice de material o de comportamiento del tipo de suelo |
| M | Magnitud de sismo |
| MSF | Factor de Magnitud de Escala |
| N | Número de Golpes |
| N60 | Número de golpes corregido por eficiencia del equipo |
| N1,60 | Número de Golpes corregido por confinamiento |
| N160,cs | Número de golpes corregido por arenas limpias |
| PI | Probabilidad de Licuefacción |
| qc | Resistencia por punta del Ensayo de Cono |
| Q | Capacidad del pilote |
| SM | Arena Limosa |
| Su | Esfuerzo cortante no drenado |
| σ_v | Esfuerzo vertical total |

| | |
|-------------|----------------------------|
| σ'_v | Esfuerzo vertical efectivo |
| τ | Esfuerzo Cortante Máximo |
| μ | Presión de poros |
| V_s | Velocidad de onda cortante |
| w_h | Peso de la muestra Húmeda |
| $w\%$ | Contenido de Humedad |
| w_s | Peso de la muestra seca |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Localización de la PTAR Las Esclusas..... | 30 |
| Figura 2.1. Ubicación de las Placas y fracturas involucradas en el sector. | 33 |
| Figura 2.2. Ubicación de las Perforaciones. | 39 |
| Figura 3.1. Perfil estratigráfico A-A'.- Se observan capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades. | 60 |
| Figura 3.2. Perfil estratigráfico B-B'.- Se observan cuatro capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades..... | 61 |
| Figura 3.3. Perfil estratigráfico C-C'.- Se observan capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades..... | 62 |
| Figura 3.4. Zonas Susceptibles a licuefacción..... | 64 |
| Figura 3.5. Curva con las zonas potencialmente licuables propuestas por Seed, 2003, junto con las diferentes muestras de cada perforación. ... | 65 |
| Figura 4.1. Mapa de Peligrosidad Sísmica del Ecuador. | 74 |
| Figura 4.2. Coeficiente de Reducción (rd). | 77 |
| Figura 4.3. Factor de corrección por presión de confinamiento. | 78 |
| Figura 4.4. Variación de MSF con qc_{1Ncs} y N_{160cs} para suelos cohesivos. | 80 |
| Figura 4.5. Contenido de Finos..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.6. Curva patrón de Boulanger e Idriss con CSR para $M=7.5$ y $P_a=1\text{atm}$, para análisis de las muestras del proyecto PTAR Las Esclusas. | 91 |
| Figura 5.1. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 1m de profundidad. | 96 |
| Figura 5.2. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 3m de profundidad. | 97 |
| Figura 5.3. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 5m de profundidad. | 98 |
| Figura 5.4. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 10m de profundidad. | 99 |
| Figura 5.5. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 15m de profundidad. | 100 |
| Figura 5.6. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 18m de profundidad. | 101 |
| Figura 5.7. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción para cada Perforación. | 102 |
| Figura 5.8. Mapa representativo de los asentamientos post-licuefacción. | 103 |
| Figura 6.1. Prueba de columnas de grava en la PTAR Las Esclusas. | 109 |
| Figura 6.2. Reemplazo de material en la PTAR Las Esclusas. | 110 |
| Figura 6.3. Colocación de Wick Drains. | 112 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.4. Compactación Dinámica..... | 114 |
| Figura 6.5. Vibro Compactación. | 116 |
| Figura 6.6. Inyección de Cemento..... | 117 |
| Figura 6.7. Hincado de Pilotes..... | 118 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I. Coordenadas de las Perforaciones | 41 |
| Tabla II. Coordenadas de Ensayos CPT | 43 |
| Tabla III. Clasificación de suelos de acuerdo al Ic. | 44 |
| Tabla IV. Coordenadas Ensayo Geofísico | 46 |
| Tabla V. Clasificación del perfil del suelo. | 47 |
| Tabla VI. Granulometría | 48 |
| Tabla VII. Parámetros Geotécnicos | 50 |
| Tabla VIII. Ensayos de Laboratorio | 70 |
| Tabla IX. Valores del Factor Z en función de la Zona Sísmica Adoptada. | 74 |
| Tabla X. Tipo de Suelo y Factores de sitio Fa. | 75 |
| Tabla XI. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación E. | 87 |
| Tabla XII. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación B. | 88 |
| Tabla XIII. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación C. | 89 |
| Tabla XIV. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación G. | 90 |

| | |
|---|----|
| Tabla XV. Resumen de los resultados obtenidos en la PTAR. | 93 |
|---|----|

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

El sector de Las Esclusas, ubicado en el Guasmo Sur, en la ciudad de Guayaquil posee suelos con características geológico-geotécnicas heterogéneas, debido a que se encuentra en las riberas del Río Guayas, lo que dificulta la predicción de variaciones localizadas en la estratigrafía; esto obliga a que se deban realizar estudios profundos, en el caso de que se requiera realizar una construcción en dicho suelo.

En el 2014 se realizaron varios estudios para el diseño y construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “PTAR Las Esclusas”, incluida la cimentación de la misma, la cual, debido a la posibilidad de la presencia de licuefacción contó con pilotes que miden entre 27.5 – 39 metros de longitud. Al momento de ejecutar el pilotaje de varias de las estructuras; se notó que los pilotes no alcanzaron la cota de diseño, debido a la presencia de un estrato resistente a 20 metros aproximadamente, por lo que se decidió, realizar un estudio más minucioso con nuevas perforaciones para analizar el suelo del sitio de obra e identificar la posibilidad de licuefacción en el área.

En el presente proyecto integrador se busca analizar el potencial de licuefacción de los diversos estratos presentes en el suelo que va a albergar la Planta de tratamiento de Aguas Residuales “PTAR Las

Esclusas". La determinación de dicho potencial se efectuó a través de la comparación de los esfuerzos cíclicos vs. la resistencia cíclica del suelo, mediante el uso de la estratigrafía obtenida de varias perforaciones realizadas en el sector, y de esa forma calcular los asentamientos que podrían darse en el caso de un sismo.

A lo largo del área de estudio, se ejecutaron 12 ensayos de SPT (Standard Penetration Test) y 3 de CPT (Cone Penetration Test), así como un ensayo geofísico de propagación de ondas sísmicas (V_s), con los cuales fue posible graficar la estratigrafía y analizar cada uno de los estratos, de esta forma, se pudo evidenciar que el suelo está compuesto de varias capas de arena limosa de baja plasticidad, tipos de suelo que por lo general, son susceptibles a licuarse y ameritan un estudio especializado, para determinar los asentamientos en el caso de un sismo e implementar la cimentación más idónea.

Mediante el uso de las gráficas propuestas por Seed (2003), se logró seleccionar los estratos susceptibles a licuarse, mientras que con la gráfica propuesta por (Boulanger & Idriss, 2014), se identificaron los estratos con alto potencial de licuación; para el cálculo de los asentamientos se utilizó el método propuesto por (Yoshimine, 2006).

Una vez calculados los asentamientos por licuefacción, en las perforaciones que cumplieron con los parámetros antes expuestos, se decidió proponer algunas posibles soluciones.

1.2 Planteamiento del Problema

Durante la ejecución de la cimentación de varias estructuras de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “PTAR Las Esclusas”, se comprobó la presencia de un estrato resistente, el cual impidió alcanzar la cota de diseño de los pilotes, motivo por el que se decidió realizar un nuevo estudio del subsuelo.

El presente análisis, busca identificar la posibilidad de la presencia de licuefacción en el sitio de la obra, dar a conocer cómo afectaría dicho fenómeno, y así poder brindar posibles soluciones.

1.3 Hipótesis

Un análisis del potencial de licuación para la obra PTAR Las Esclusas permitirá implementar un diseño apropiado de cimentación para las condiciones del suelo existentes.

La importancia de incluir dicho análisis como efecto inducido en función de las condiciones geológicas y geotécnicas obtenidas en la fase de planeación y de investigación preliminar, y basándose en la comparación

del esfuerzo cíclico de terremotos con la resistencia del suelo, se correlacionará al CRR del suelo con los parámetros in situ de los ensayos SPT permitiendo generar un reporte a tiempo con soluciones factibles. Un análisis erróneo de este fenómeno conlleva al incremento substancial del costo de la obra.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar el potencial de Licuefacción en la cimentación de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales "PTAR Las Esclusas", mediante un análisis de susceptibilidad de licuefacción de suelos, para garantizar un buen comportamiento de la cimentación.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las características geológicas-geotécnicas del sitio de obra.
- Realizar los perfiles geotécnicos mediante la estratigrafía del suelo de la PTAR Las Esclusas.
- Determinar la susceptibilidad a la licuefacción en la columna estratigráfica.

- Obtener el esfuerzo cíclico y la resistencia cíclica del suelo, mediante las características del subsuelo de la PTAR Las Esclusas.
- Determinar el potencial de licuefacción mediante el método empírico de Idriss y Boulanger 2014 para ensayos SPT.
- Calcular los asentamientos en las perforaciones con potencial de licuarse.
- Elaborar mapas de zonificación de la presencia de licuefacción y asentamientos.
- Proponer posibles soluciones.

1.5 Metodología de Estudio

El presente estudio es del tipo deductiva e inductiva; partiendo de los datos recopilados de los trabajos de campo del sitio y a su vez con los ensayos de laboratorio pertinentes, se procede a elaborar una base de datos que abarque todos los factores que influyen en la ocurrencia del fenómeno de licuación. El análisis de los datos inicia con perfiles estratigráficos, donde se puede apreciar las capas de suelo que se repiten en los distintos puntos de las perforaciones y sondeos realizados.

De los resultados de las características geo-mecánicas de las muestras recopilados anteriormente, se procederá al análisis por medio del método propuesto por Boulanger & Idriss, (2004) y Seed (2003), para la

evaluación del potencial de licuación en base a los ensayos SPT, permitiendo así, obtener las muestras susceptibles a licuefacción. En base a esto se determinará el factor de seguridad contra la licuación, el índice de potencial de licuación y el número de severidad de licuación en los suelos del sector las Esclusas. Para el desarrollo de este método se utilizarán hojas de cálculo generadas en Excel, facilitando los cálculos respectivos.

Adicional a los análisis, se elaborarán mapas del área los cuales contendrán las condiciones que intervienen en la probabilidad de amenaza que el suelo sea licuable, mediante la aplicación del álgebra de mapas desarrollada con el software ArcGis v.10.3.1 especializado en sistemas de información geográfica (SIG) y finalmente una vista en 3D mediante el software ArcScene.

1.6 Área de Estudio

1.6.1 Ubicación del Proyecto

El Proyecto se desarrolla en la ciudad de Guayaquil, Guasmo Sur, al Sur del Estero Cobina, muy próximo al Río Guayas, como se indica en la figura 1.1.



Figura 1.1. Localización de la PTAR Las Esclusas.
Fuente: Google Earth, 2017

CAPITULO 2

ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

2.1 Caracterización Geológica

Acorde a lo estipulado en la hoja geológica de Guayaquil, DGGM (1979), se reconoce que el sector, se encuentra ubicado en depósitos aluviales recientes o depósitos fluvio-marinos, arenosos a limo-arenoso, según el mapa morfo-pedológico de Guayaquil, Pronareg (1984).

Por otro lado, la ciudad de Guayaquil se encuentra influenciado por la ocurrencia de diferentes procesos naturales que dan forma a los paisajes y morfologías presentes en su alrededor. Como lo son el Golfo de Guayaquil (GG), la cuenca Progreso – Guayaquil – Tumbes y la Cordillera Chongón Colonche (CCC).

El Golfo de Guayaquil (G.G.) está localizado en el segmento Sur del margen continental del Ecuador.

El G.G. se encuentra ubicado al Este de la Fractura de Grijalva, la misma que divide la placa Nazca, limitando corteza con edades menores de 25 Ma de la vieja corteza Farallón de edades mayores a 25 Ma (Spikings et al., 2001). La Fractura de Grijalva probablemente se extiende debajo de la Placa Sudamericana (Gutscher et al. 1999; Spikings et al., 2001. (Figura 2.1).

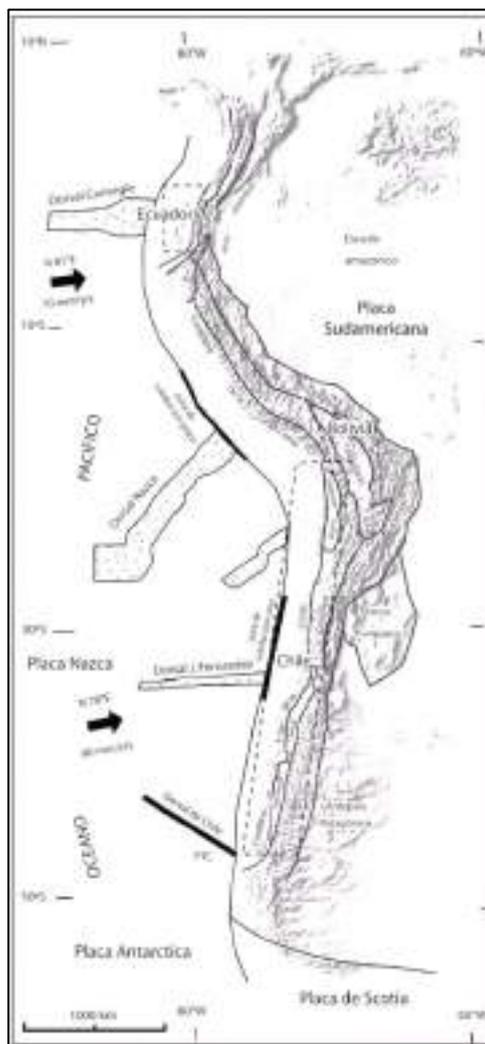


Figura 2.1. Ubicación de las Placas y fracturas involucradas en el sector.

Fuente: Lavenu, A. 2010

Dumont et la (2010) divide en 2 partes al Golfo de Guayaquil:

- Golfo Externo, que corresponde a la zona limitada por Punta Arena al norte y la Bahía de Tumbes al sur llamándolo golfo sensu-lato, que comprende la zona levantada del G.G.

- Golfo interno o golfo sensu- estricto, que comprende la zona de costa baja de manglar.

La cuenca sedimentaria del Golfo de Guayaquil - Tumbes (CGGT) representa el resultado de interrelación tectónica de Bloque NorAndino (BNA), la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana. Esta relación fue propuesta por Campbel (1974).

Artículos recientes han estudiado la estructura y arquitectura general de la cuenca (Witt et al, 2006-2009) y su relación con el BNA. El modelo estructural del Golfo marino de Guayaquil de Witt y Bourgois (2009), muestra que esta zona es afectada por dos sistemas de fallas:

- El sistema de fallas Normales Domito (SFD) y el Banco Perú (BC) con dirección NS, que se encuentra paralelas a la fosa.
- El Detachment Posorja (DP) y Detachment Tumbes (DT) y el sistema de fallas Puna- Santa Clara (SFPSC) con dirección NE-SW. La subsidencia del DP empezó durante el pleistoceno temprano (Witt. Et al, 2006). El DT posee un rumbo paralelo a la costa, lo que marca el límite Sur de la subsidencia de la cuenca del Golfo de Guayaquil. El SFPSC comprende Puna, la plataforma Santa Clara y la estructura Amistad.

Benítez et al (1995) llama Cordillera Chongón- Colonche (CCC) al desarrollo orográfico de dirección NNO-SSE desde Guayaquil hasta el sector de Olón- Pedro Pablo Gómez, y Cordillera Costera (CCO) al sector

que sigue a continuación, pero con dirección aproximada N-S. La CCC está limitada hacia el sur por la falla Colonche de dirección N10 W.

Ambas cordilleras se caracterizan por presentar un basamento de rocas ígneas básicas denominado formación Piñón y una evolución estratigráfica estructural cretácea- eocena comparable, aunque en el detalle presentan diferencias importantes.

El grupo Chongon Propuesto por Benítez (1995) y simplificado por alemán (1999), para agrupar a las Formaciones Calentura, Cayo y Guayaquil.

- La Formación Calentura. - Esta formación presenta calizas grises oscuras a negras con inter estratificaciones finas de tobas calcáreas de lapillie inter estratificadas con margas en estratos delgados a medios, de tobas lapilli de grano grueso. La parte superior de la Formación Calentura está conformada por lutitas tobáceas y tobas lapilli de la Formación Cayo (Alemán, 1999).
- La Formación Cayo.- Este nombre se propuso por Olsson (1942) para describir una sucesión potente (más de 3000 m en promedio) de color gris oscuro a gris verdoso, rítmicamente estratificado en un macizo de lutitas tobáceas e inter estratificados de tobas lapilli con conglomerados volcánico clásticos y brechas que aflora cerca de Puerto Cayo (Hoffstetter, 1977; Santos y Ramírez, 1986; Benítez, 1988 y 1990). Esta unidad tiene

una distribución extensa en las cuencas de Progreso, Santa Elena y Manabí con los mejores afloramientos en la cordillera de Chongón-Colonche y en las colinas de Jipijapa (cerca de Portoviejo). Está formada por brechas volcanoclásticas estratificadas en aglomerados y macizos muy gruesos que cambian hacia el techo a rocas turbidíticas volcanoclásticas, principalmente areniscas y lutitas tobáceas silicificadas (Benítez 1988, 1990). La formación Cayo tiene una edad del Senoniense a danés. (Cushman, 1951; Church y Thalman, 1946.

- La Formación Guayaquil.- El nombre de "Miembro de Guayaquil" fue dado por Sinclair y Berkey (1924) para describir la parte superior de la "Formación cretácica del litoral" de Wolf (1892), y fue originalmente confundida por Sheppard (1926) con la Formación San Eduardo. Después, Thalmann (1946) redefinió esta unidad, y en 1975 Bristow la consideró como un Miembro de la Formación Cayo. Según alemán (1999) esta Unidad debe llevarse al rango de Formación. Comprende una secuencia de capas delgadas en un macizo de chert negro brillante y tobas silicificadas oscuras, lodolitas duras y areniscas volcanoclásticas, con estratificaciones delgadas de lutitas duras, negras (Bristow y Hoffstetter, 1977). La edad de esta Formación en Savoyat et al. (1970) es Maestrichtiense a posible Danés. Gamber et al. (1990), han documentado la presencia de radiolarios, microfósiles calcáreos que se encuentran entre el Maestrichtiense superior y el Danés basal. El

Maestrichtiense superior al Danés de la Formación Guayaquil se correlaciona con la Formación de Yunguilla en la Cordillera Occidental (Bristow y Hoffstetter, 1977).

- la Formación Piñón es un complejo ígneo en el cual se distinguen la Formación Piñón sensu strictu: rocas basálticas de suelo oceánico (Goosens et al, 1977), la Formación San Lorenzo: toleítas de arco insular (Lebrat, 1985) y rocas intrusivas de varias edades y composición. Esta formación normalmente es confundida con la formación Piñón ss, pero es parcialmente equivalente a la Formación Cayo llamada Unidad Superior del Complejo ígneo básico por Goosens et al (1977). Entre la Formación Piñón ss y la Formación Cayo, existe el arco Cayo. Un conjunto de rocas de composición y paleo ambiente interpretado como un arco insular, formado por rocas basálticas porfíricas con estructuras variadas como columnas basálticas, pillow lavas y brechas (Benítez, 1995).

2.2 Prospección Geotécnica de Campo

Los trabajos de campo realizados fueron ensayos mecánicos y geofísicos. Los mecánicos consistieron en perforaciones ejecutadas con metodología de percusión y lavado.

Dentro del estudio de asentamientos se realizó el análisis de Estabilidad Límite de rotura por falla y análisis de asentamientos, para las

condiciones: estática y Pseudo-estática, ya que en el terreno se proyectan rellenos hasta las cotas +4,0 y +5,0 msnm.

2.2.1 Perforaciones Mecánicas

Para conocer el tipo de geo materiales depositados a las diferentes profundidades, así como sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, se realizan las perforaciones mecánicas permitiendo tomar muestras y obtener los parámetros necesarios, tanto en campo como en laboratorio. Para el sector de las Esclusas se compiló información, tales como 12 perforaciones.

Las perforaciones se agruparon de acuerdo a su ubicación, para ser ilustrados y analizados mediante perfiles geotécnicos con las estratigrafías, así como para la determinación del potencial de licuefacción.

Las muestras fueron obtenidas para caracterizar de manera preliminar las condiciones del subsuelo y consecuentemente realizar los ensayos en el laboratorio.

Se realizó una clasificación visual preliminar de suelos en el campo, de acuerdo con la norma ASTM D 2487 (Sistema de Clasificación de Suelos Unificada).

2.2.1.1 Ubicación de las Perforaciones

Como parte de la campaña de exploración geotécnica se realizó ensayos de tipo mecánico y geofísico. Los ensayos mecánicos consistieron de 12 perforaciones ejecutadas con metodología de percusión y lavado, como se puede observar en la figura 2.2.

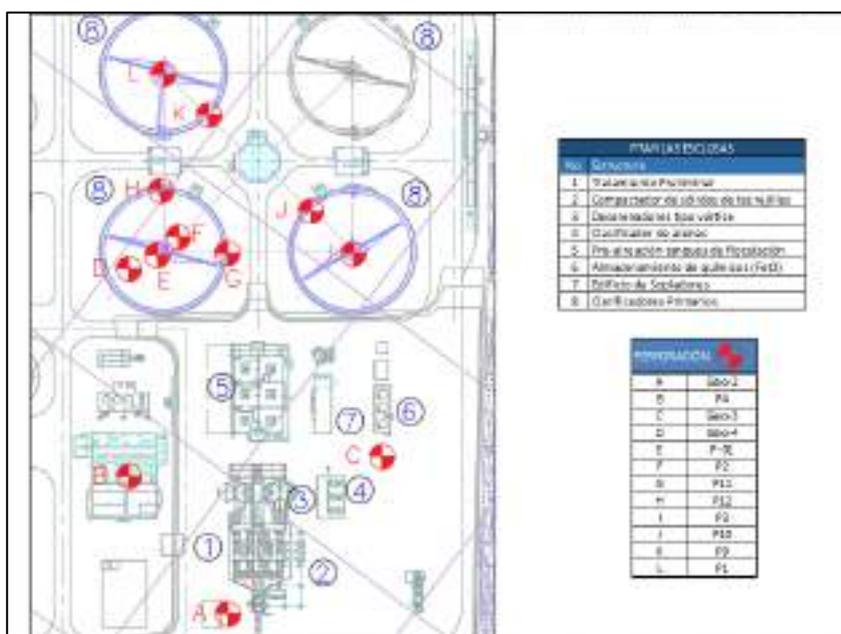


Figura 2.2. Ubicación de las Perforaciones.

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

En la Figura 2.2., se muestra parte de la implantaci3n de la PTAR, así como la campaña de exploraci3n geotécnica, que se realiz3 para identificar la distribuci3n de los geo-materiales encontrados en el subsuelo. Se decidi3 agrupar

los sondeos más próximos, y mediante perfiles, tener un mejor entendimiento del comportamiento del suelo.

2.2.1.2 Ensayos SPT

El ensayo de penetración estándar SPT es realizado durante la perforación, permitiendo obtener un valor de N representativo de la resistencia a la penetración, el cual puede ser correlacionado con parámetros geotécnicos como lo son la densidad relativa y carga admisible.

La información obtenida de este ensayo son el número de golpes N y la toma de muestras para realizar pruebas de laboratorio. De esta manera identificar el tipo de suelo con su respectiva clasificación SUCS y el porcentaje de finos.

A continuación, se describirán las perforaciones en función de su ubicación y profundidad.

Tabla I. Coordenadas de las Perforaciones

| Perforación | Coordenadas (UTM) | | Profundidad [m] | Perforación (Anexo B) |
|-------------|-------------------|---------|--------------------|--------------------------|
| | Este | Norte | | |
| A | 626273 | 9749081 | 39.85 | Geo-2 |
| B | 626228 | 9749218 | 45 | P4 |
| C | 626362 | 9749079 | 35.4 | Geo-3 |
| D | 626374 | 9749358 | 34.95 | Geo-4 |
| E | 626217 | 9749226 | 20.8 | P-01 |
| F | 626377 | 9749193 | 40 | P2 |
| G | 626392 | 9749171 | 40 | P11 |
| H | 626399 | 9549207 | 40 | P12 |
| I | 626422 | 9749136 | 48.5 | P3 |
| J | 626424 | 9749159 | 40 | P10 |
| K | 626452 | 9749217 | 40 | P9 |
| L | 626444 | 9749243 | 42.5 | P1 |

Fuente: Cordero, M., Torr , M., 2017

Las muestras fueron obtenidas por medio de:

- Cuchara partida, para el ensayo de penetración estándar (SPT), de 2 pulgadas de diámetro exterior DE, y de 1.375 pulgadas de diámetro interior DI, para las pruebas de penetración estándar (SPT), empleando martillo tipo Safety (63.5 Kg, 0.76m altura de ca da y varillas AW). Los valores de N60 reportados ya consideran la afectación por la energía transmitida por el martillo.
- Tubo de pared delgada o tubo Shelby, de 75mm (3 pulgadas) de diámetro y 1.6mm de espesor.

En el Anexo B se pueden encontrar los resultados de los ensayos.

2.2.1.3 Ensayo CPT

El ensayo de penetración estática CPT, mide la reacción del suelo ante la penetración continua de una punta cónica mediante los parámetros de resistencia de la punta y rozamiento lateral. (Vallejo L. G., 2004)

A partir de los datos obtenidos es posible realizar correlaciones con los parámetros geotécnicos de ángulo de rozamiento, módulo de Young.

Para los CPT, un aspecto de procedimiento que requiere aclaración para las aplicaciones de licuefacción es corrección de la resistencia medida de la punta (q_c) para efecto de áreas desiguales (Campanella et al. 1982).

$$q_t = q_c + (1 - a_r)u_2 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Dónde:

q_t = la resistencia de la punta del cono corregida para efectos desiguales del área final.

a_r = relación de área para la punta del cono (valores típicos entre 0.65 y 0.85).

u_2 = presión de poro medida detrás de la punta del cono.

La magnitud de esta corrección puede ser significativa para las arcillas suaves (como $u_2 > u_0$, donde u_0 = estado estable o presión de poro hidrostática), pero típicamente es bastante pequeña para arenas (como $u_2 \approx u_0$). Por lo tanto, los términos q_c y q_t son aproximadamente igual en arenas y, a menudo, se usa indistintamente, incluso si la corrección para el área desigual efectos se ha realizado.

Tabla II. Coordenadas de Ensayos CPT

| Perforación | Coordenadas | | Profundidad [m] |
|-------------|-------------|---------|--------------------|
| | Este | Norte | |
| CPT-3 | 626343.4 | 9749138 | 31.26 |
| CPT-4 | 626419.7 | 9749142 | 35.56 |
| CPT-5 | 626445.1 | 9749254 | 30.58 |

Fuente: Subterra Ingeniería Geotécnica, 2014

Con los parámetros antes mencionados, es posible estimar la clasificación del suelo y caracterizar la resistencia al esfuerzo cortante de los mismos. Por otro lado, mediante el Índice de material o de comportamiento del tipo de suelo (I_c), se diferencian los suelos granulares de los finos, ya que al presentar un I_c superior a 2.6, estos son considerados finos. La tabla a continuación muestra

la clasificación de suelos de acuerdo al Ic, según (Robertson, 1990).

Tabla III. Clasificación de suelos de acuerdo al Ic.

| Zona SBT Robertson (1990) | Descripción SBT |
|---------------------------|--|
| 1 | Suelos finos sensitivos |
| 2 | Arcillas – Suelos Orgánicos |
| 3 | Arcillas: Arcillas a arcillas limosas |
| 4 | Mezclas de limos: Arcillas limosas y limos arcillosos |
| 5 | Mezcla de arenas: Arenas limosas a limos arenosos. |
| 6 | Arenas: Arenas limpias a arenas limosas. |
| 7 | Arena densa a arena gravosa. |
| 8 | Arena firme a arena arcillosa (sobre-consolidada o cementada). |
| 9 | Suelos finos firmes (Sobre-consolidado o cementado). |

Fuente: Robertson, 1990

En el Anexo B se pueden encontrar los resultados de los ensayos, con los valores requeridos para una efectiva caracterización del suelo.

2.2.1.4 Ensayos Geofísicos

2.2.1.4.1 Ensayo ReMi

Mediante este método se obtiene un análisis espectral de las ondas superficiales de baja frecuencia del tipo Rayleigh, incluidas en el ruido sísmico ambiental, o generadas artificialmente. A partir de estas se emplea un software, el cual mediante un proceso de inversión obtiene la velocidad de las ondas de corte V_s .

El ensayo REMI es un método geofísico de análisis de micro tremores que se basa en el análisis de inversión de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh para un sitio determinado, obtenida a partir de registros de ruido ambiental o micro tremores. Dichos registros son grabados en campo utilizando un equipo estándar de refracción sísmica y el producto final del método es un perfil unidimensional de las velocidades de onda cortante para el área en estudio.

Tabla IV. Coordenadas Ensayo Geofísico

| Perforación | Coordenadas | |
|-------------|-------------|-----------|
| | Este | Oeste |
| REMI-2 | 626428.0 | 9749200.0 |

Fuente: Geoestudios, 2014

En función del valor de Vs obtenido y a partir de los ensayos REMI, se clasifica el suelo del proyecto según la Tabla V.

Tabla V. Clasificación del perfil del suelo.

| Tipo de Perfil | Descripción | Definición |
|---|--|---|
| A | Perfil de roca competente. | $V_s \geq 1500$ m/s |
| B | Perfil de roca de rigidez media. | 1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s |
| C | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante, o | 760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s |
| | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios. | $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa |
| D | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s |
| | Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones. | $50 > N \geq 15.0$ 100 kPa $> S_u \geq 50$ Kpa |
| E | Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | $V_s < 180$ m/s |
| | Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas. | $40\% S_u < 50$ Kpa |
| Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases: | | |
| F1: Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. | | |
| F2: Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). | | |
| F | F3: Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75). | |
| | F4: Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m). | |
| | F5: Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte. | |
| | F6: Rellenos colocados sin control ingenieril. | |

Fuente: NEC, 2015

2.3 Ensayos de Laboratorio

2.3.1 Granulometría

La granulometría nos permite conocer la proporción de cada tamaño de partículas que tiene un suelo. El ensayo se realiza según la norma ASTM D422-66, donde las muestras se analizan mediante el tamizado. Todas las partículas retenidas en los diferentes tamices desde la malla 3" hasta el tamiz N°200 son pesadas para la elaboración de una curva de distribución granulométrica.

Tabla VI. Granulometría

| Geo Material | Tamiz Pasante | Tamiz Retenido |
|---------------------|----------------------|-----------------------|
| Grava | 3" | N°4 |
| Arena Gruesa | N°4 | N°10 |
| Arena Media | N°10 | N°40 |
| Arena Fina | N°40 | N°200 |
| Limos y Arcillas | N°200 | - |

Fuente: Terzaghi, 1980

2.3.2 Contenido de Humedad

El ensayo se realiza bajo la norma ASTM D2216, permite conocer el porcentaje de agua contenido en una muestra de suelo. La muestra es colocada en un recipiente y pesada obteniendo w_h , luego es sometida a secado en horno a temperatura de $110^\circ \pm 5^\circ$

durante un aproximado de 24 horas. Una vez seca la muestra esta se pesa, obteniendo w_s .

El porcentaje de agua se calcula mediante la siguiente formula:

$$\%W = \frac{w_h - w_s}{w_s - r} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Dónde:

r: Masa del recipiente.

Es de gran importancia para la identificación del estado de los materiales finos, ya que estos cambian su comportamiento en base al porcentaje de humedad. Para establecer el grado de consistencia en la que se encuentra un material, comparando la humedad natural con el límite líquido y plástico.

2.3.3 Densidad Relativa

Para conocer el grado de compacidad que una muestra de suelo tiene, se determina la densidad relativa. Como parte de los resultados del ensayo SPT, una de las correlaciones que se generan es con la de densidad relativa vs el número de golpes N corregido para el contenido de finos mediante la siguiente expresión:

$$\rho_r(\%) = 100 * \sqrt{\frac{N_{1,60}}{60}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

2.3.4 Límites de Atterberg

Para la obtención del límite líquido y el índice plástico, se utiliza el ensayo de los límites de Atterberg.

El LL determina el contenido de humedad por debajo del cual el suelo puede llegar a comportarse como un material plástico. A dicho nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. A diferencia, el IP, es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como un material no plástico. Ambos usados en la identificación y clasificación de suelos.

2.4 Parámetros Geotécnicos

La obtención de los parámetros geotécnicos se realiza mediante los resultados obtenidos de los ensayos de campo y laboratorio. Estos parámetros servirán para determinar comportamientos de los estratos de suelo presentes en la obra.

Tabla VII. Parámetros Geotécnicos

| Nombre | Simbología | Unidad |
|--------------------|-------------------|---------------|
| Contenido de finos | CF | % |
| Humedad natural | w | % |
| Límite líquido | LI | % |

| | | |
|----------------------------------|-----|--------------|
| Límite Plástico | Lp | % |
| Límite de contracción | Lc | % |
| Índice Plástico | IP | % |
| Índice de liquidez | IL | adimensional |
| Índice de consistencia | Ic | adimensional |
| Actividad relativa | Ra | - |
| Numero de golpes corregido | N60 | Golpes |

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS LICUABLES

3.1 Suelos Licuables

En zonas donde exista nivel freático alto y se encuentre material granular no consolidado, las vibraciones de terremotos pueden llegar a generar el fenómeno de licuefacción.

Las vibraciones del suelo generan pérdida de resistencia al corte, y la rigidez de los depósitos se reduce debido al aumento de la presión de poros, como consecuencia, por un tiempo corto el suelo se comporta consistencia de un fluido, incapaz de soportar estructura alguna. Este fenómeno genera el fallo en cimentaciones, rotura de taludes y deslizamientos.

Los suelos propensos a perder gran parte de su resistencia ante sollicitaciones dinámicas son arenas finas sueltas y las arenas y limos mal graduados, ya que el agua intersticial drena con mayor facilidad, generando el reordenamiento de las partículas del suelo debido a la variación en el índice de vacíos y por lo tanto su densificación.

Parte de las condiciones necesarias para que se dé lugar a la licuefacción es alto nivel freático (NF) y el grado de compactación sea bajo, algunos autores consideran bajan compacidad a valores de número de golpes de SPT menores a 20. Otra de las propiedades que son características de los suelos licuables es el grado de saturación del 100%, contenido de

finos menor al 10% y bajo grado de compactación, N menor a 10 para profundidades menores a 10m y N menor a 20 para aquellas profundidades mayores a los 10m. (Vallejo L. G., 2004)

Los ensayos mencionados en el capítulo II sirven para generar un análisis superficial del potencial de licuefacción mediante la observación de los valores mencionados anteriormente como IP, LL, N60 y NF.

3.2 Perfiles Geotécnicos Analizados

Para apreciar de mejor manera las características que presenta el suelo a lo largo de la obra, se realizaron tres perfiles.

La resistencia de los suelos estará definida por el número de golpes obtenido de las perforaciones mecánicas, y la resistencia por punta (q_t) que se obtiene a través de los ensayos CPTu, para la obtención de velocidad de onda Vs se usaran los ensayos geofísicos, los cuales sirven de referencia para generar parámetros y clasificar el suelo.

3.2.1 Perfil A-A'

El perfil A-A', tiene una longitud de 250 m, se consideraron las perforaciones: D, E, F, H, K y L, además, se tomaron en cuenta los ensayos de penetración de punta de cono: CPT-3 y CPT-5, realizados en el 2014.

Se denotó la presencia de una capa de suelo conformado por arcilla de alta plasticidad (CH), con un espesor que oscila entre 1.5 y 5.0 m, en todas las perforaciones, seguido de dicho estrato, se encontró una capa de arena limosa, cuyo espesor varía de 5.3 a 9.0 m, no plástico y con bajo número de golpes N60. La perforación E, muestra una pequeña capa de arcilla de alta plasticidad de consistencia muy blanda a 5.3 m de profundidad, que no aparece en ninguna otra perforación, excepto la K, pero esta capa se encuentra a 9 metros de profundidad.

A continuación, a aproximadamente 8.0 m, las perforaciones K y L, registraron un estrato de arena limosa que no se apreció en las demás perforaciones, lo que indica que podría tratarse de un lente arenoso de 1 m de espesor. Luego, existe una capa de material arcilloso con un espesor variable entre 2.0 y 12.0 m, seguido de arcilla de alta plasticidad, con un espesor de 6.0 m.

A los 25.0 m se presentó un estrato arcilloso de consistencia blanda a dura (CH), con un espesor aproximado de hasta 17.0 m.

Como parte de la caracterización, se tomó en cuenta los ensayos de penetración de punta de cono mencionados previamente, los cuales muestran superficialmente un estrato de aproximadamente 8.0 m, el cual disminuye a lo largo del perfil, la resistencia de punta

(qt) es inferior a 2.0 MPa, con un I_c entre 3 y 4, lo que corrobora que es un estrato arcilloso, el segundo estrato en cambio, fue una arena de 2.0 m de espesor, el cuál va aumentando a medida que se avanza en el perfil de la Figura 3-1. Además, se presentaron capas de arcillas y arenas limosas, hasta los 40.0 m de profundidad.

3.2.2 Perfil B-B'

En el perfil B-B', se consideraron las perforaciones D, E, G, H, J e I. Se incluyó también el ensayo de penetración de punta de cono, CPT 4 (2014) de Geoestudios. La Figura 3-2, muestra el perfil con cada uno de los ensayos realizados.

El terreno cuenta con una capa de material de relleno (cascajo), con un espesor aproximado de 70 cm, como se indica en varias de las perforaciones, observadas también en las perforaciones G y J (Anexo A). Bajo el material de relleno existe un estrato de arcilla, con un espesor promedio de 4.5 m, la cual se presenta en todas las perforaciones.

En el estrato siguiente, se evidencio una capa de arena limosa de 7 m de espesor, la cual presentó una compacidad suelta a medianamente densa, con número de golpes (N60) entre 5 y 15,

la continuidad de la misma puede observarse en todas las perforaciones.

A continuación, a una profundidad de 10.50 m, se encontró un estrato de arcilla, cuyo espesor es variable, como se pudo observar en las perforaciones D, G, I y J poseen un número de golpes N60 de 1 a 2, su índice de plasticidad es en promedio 62%.

Aproximadamente 7 m después, se encuentra una capa de arcilla y a los 13 m, una de arena limosa con un espesor variable de promedio 12.5 m, es muy probable que, debido a la ubicación del área de estudio, este tenga influencia del Río Daule ya que se crea una discontinuidad en el estrato arcilloso.

A continuación, existe un estrato arenoso de espesor variable, y a los 25.5 m, se encontró en todas las perforaciones, una capa arcillosa de 11 m de espesor en promedio, este tiene un índice de plasticidad de 45%. La perforación G, presentó un lente arenoso a aproximadamente 27 m de profundidad.

Finalmente, a los 36 m de profundidad, se registró un estrato de arena de consistencia densa a muy densa, con número de golpes N60 variable entre 30 y 45 golpes.

En cuanto al ensayo de penetración de punta de cono CPT-4 que se consideró, se presenta un estrato superficial de 4 m, con una

resistencia de punta (q_t) inferior a 5 MPa, debido a que el valor I_c oscila entre 3 y 4, se conoce la presencia de arcillas dentro del estrato. El segundo estrato con valores de I_c menores a 2.6 y una resistencia de punta (q_t) entre 5 y 10 MPa, presentó un espesor de 7 m.

A continuación, se presentó un estrato de 4 m de espesor con q_t inferior a 2 MPa, y un I_c entre 3 y 4, lo que indicó predominancia de arcillas; en el siguiente estrato se obtuvo un I_c menor a 2.6 y un espesor de 2m, conformado en su mayoría por arena limosa; el estrato subyacente es una arcilla con características similares a la de 4 m de espesor descrita anteriormente dentro del mismo se encuentra un lente de arena. A los 25 m, se presentó un estrato de arcilla de consistencia dura, hasta los 37 m de profundidad.

3.2.3 Perfil C-C'

El perfil C-C', se elaboró considerando las perforaciones A, B y C, considerando los CPT-3 y CPT-5, como indica la figura 3-3. En la estratigrafía se presentaron estratos de arcilla de alta plasticidad en los primeros metros, seguido de un estrato de arena limosa, la cuál no se presenta en el sondeo A, por lo que no es continuo en toda la extensión de la estratigrafía.

La perforación A muestra un estrato de 13 metros de arcillas, mientras que el sondeo C, detectó una capa de arcilla de 11 metros de espesor aproximadamente, con consistencia blanda y número de golpes entre 2 y 6. Estas capas de arcillas se corroboran mediante la estimación del índice de material, en los CPT mencionados. Además, el perfil muestra una capa de arena de compacidad entre suelta y medianamente suelta de 8 metros de profundidad. Por otro lado, se vuelve a encontrar un estrato de arcilla y otro de arena limosa, seguido de una pequeña capa de turba, existente solo en la perforación B, lo que muestra que no es continua.

Se repiten varias capas continuas de arcilla con alta plasticidad y arena limosa.

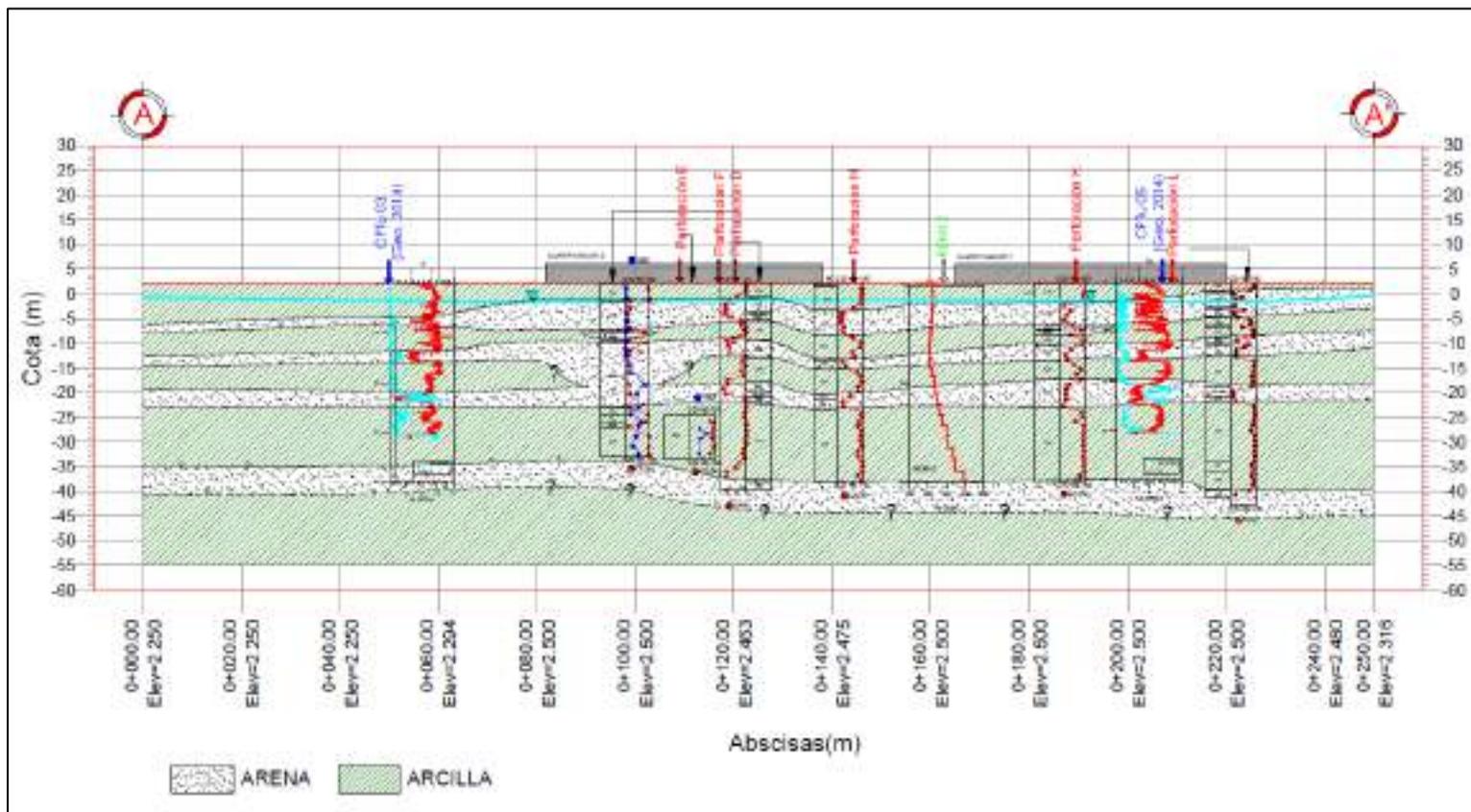


Figura 3.1. Perfil estratigráfico A-A'.- Se observan capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades.
Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

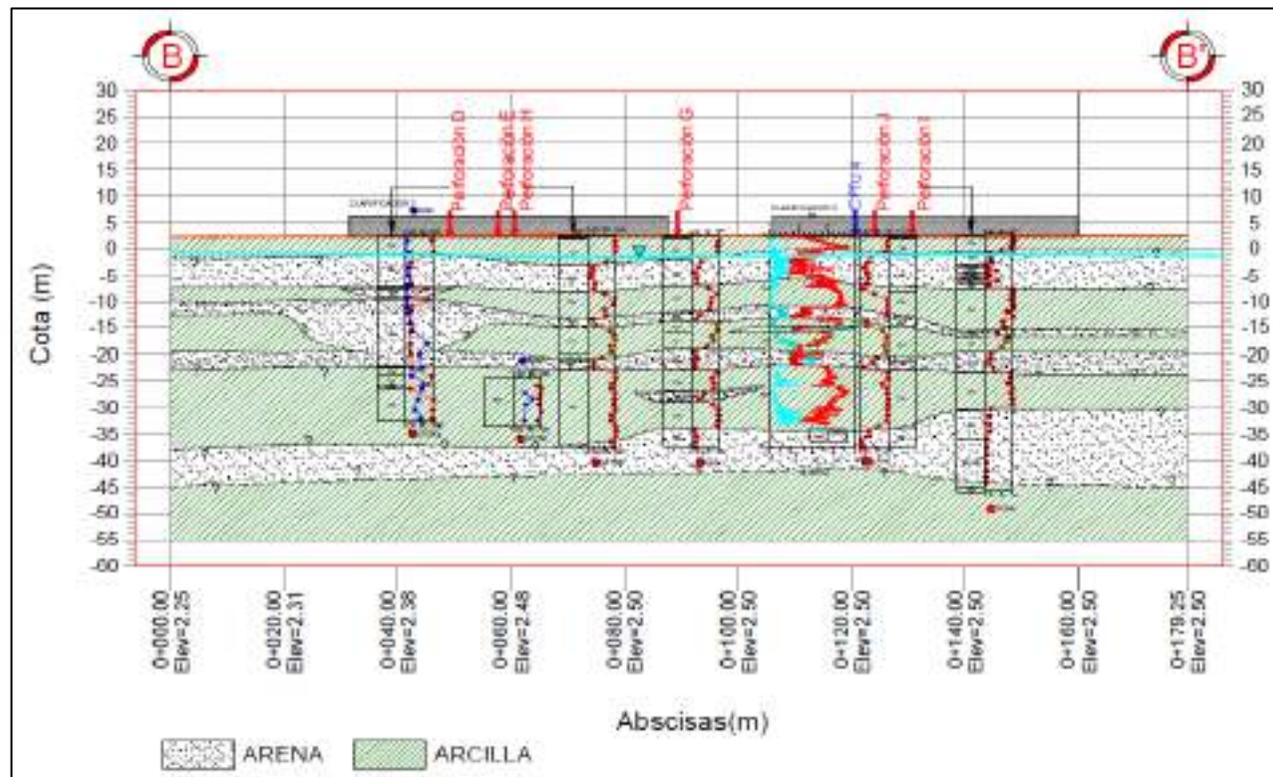


Figura 3.2. Perfil estratigráfico B-B'.- Se observan cuatro capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades.

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

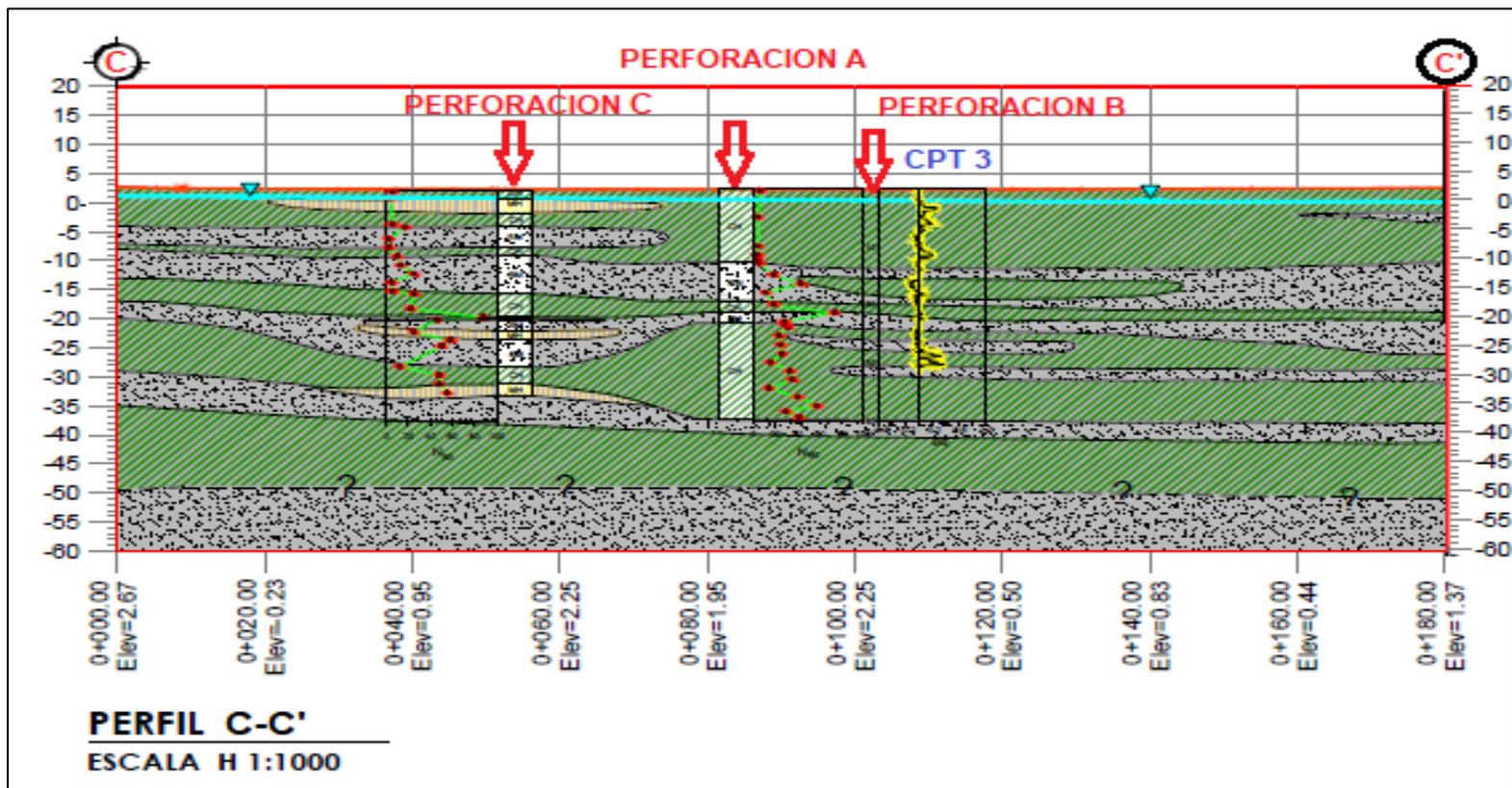


Figura 3.3. Perfil estratigráfico C-C'.- Se observan capas de suelo arena limosa a diferentes profundidades.

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

3.3 Análisis de las condiciones necesarias para licuefacción en el sector Las Esclusas

Para establecer el potencial de licuefacción de cada estrato, se relacionó el índice plástico y el límite líquido en un gráfico, como lo propuso Seed et al., 2003.

En la Figura 3-4 se observan dos zonas, la zona A está conformada por las muestras con posibilidad de licuación en el caso de que $w_c > 0.80$ LL, por otro lado, la zona B $w_c > 0.85$ LL, lo cual es aplicable para $FC \geq 20\%$ si el $IP > 12$ o $FC \geq 35\%$ si el $IP < 12$. Además, se muestra los tipos de suelo y sus características.

Se tomó el índice plástico y el límite líquido de las perforaciones, y se procedió a graficar cada muestra, y de esa forma clasificarlas y reconocer el potencial de licuación.

Se utilizaron las muestras y las características geotécnicas de las perforaciones mencionadas, para calcular el potencial de licuefacción mediante el método de (Boulanger & Idriss, 2014).

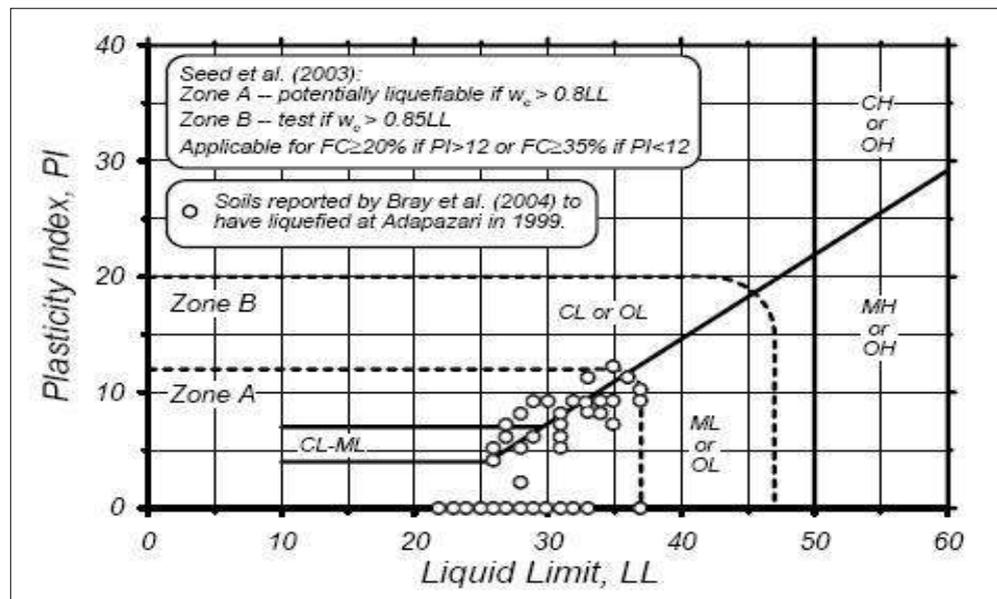


Figura 3.4. Zonas Susceptibles a licuefacción.
Fuente: Seed, 2003

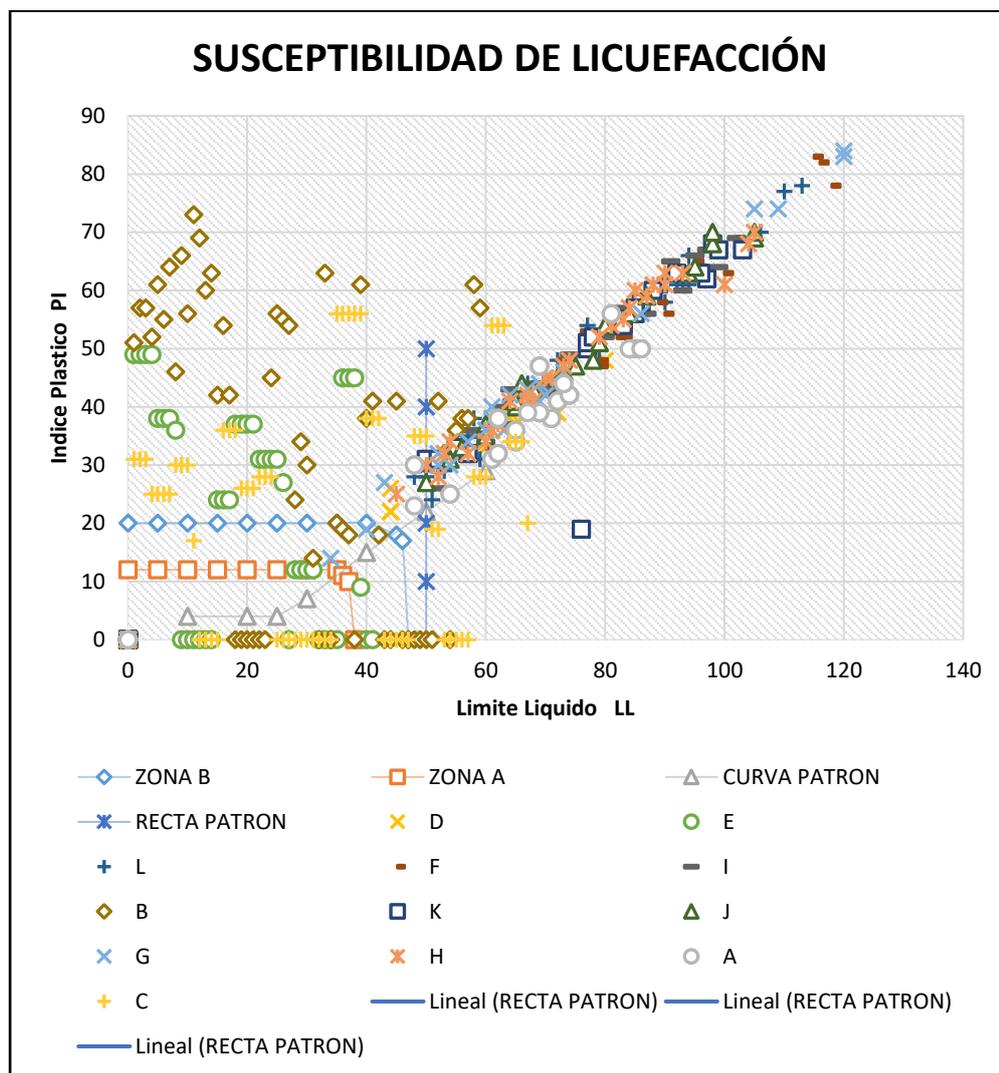


Figura 3.5. Curva con las zonas potencialmente licuables propuestas por Seed, 2003, junto con las diferentes muestras de cada perforación.

Fuente: Cordero, M., Torr , M., 2017

La figura 3.5, muestra el índice plástico vs. El límite líquido de las 627 muestras pertenecientes a las 12 perforaciones analizadas. Además, se destacan las zonas A y B, propuestas por (Seed R. B., 2010).

En la zona A, se situaron 31 muestras pertenecientes a las perforaciones B, C y E, las cuales en su mayoría son clasificadas como arcillas y limos de baja plasticidad y que su contenido de humedad fue mayor al 0.8 del límite líquido, mientras que en la zona B, se encuentran 7 muestras correspondientes a las perforaciones B, C y G, en las cuales se comprobó que su contenido de humedad fue mayor a 0.85 del límite líquido de dichas muestras.

Por lo tanto, las 38 muestras ubicadas en las zonas A y B, se seleccionaron para el análisis de potencial de licuefacción.

CAPITULO 4

POTENCIAL DE LICUEFACCIÓN EN EL SUBSUELO DE LAS ESCLUSAS

4.1 Susceptibilidad de Licuefacción

La importancia de incluir un análisis de licuación de un suelo como efecto inducido por sismos en función de las condiciones geológicas y geotécnicas en la fase de planeación y de investigación preliminar, permite reportar a tiempo para una correcta implementación del diseño preliminar de cimentación. Ya que un análisis erróneo de la misma conlleva al incremento substancial del costo de un proyecto civil.

Una vez culminadas las exploraciones en campo del subsuelo y los ensayos de laboratorio respectivos se proceden finalmente a realizar el análisis cuantitativo de licuefacción.

Un método simplificado y uno de los más usados es el propuesto por Boulanger e Idriss (2008), en el cual relacionan el esfuerzo cíclico CSR y el número de golpes $(N_1)_{60}$ de la prueba de penetración estándar SPT. Según este método el suelo se licuará si el esfuerzo cíclico CSR es mayor que la resistencia tangencial del suelo.

4.2 Análisis Cuantitativo

Debido a las arenas de compacidad suelta que se encontraron en los ensayos de exploración geotécnica el potencial de licuación es necesario de evaluar.

Para dicho análisis el enfoque está basado en la comparación del CSR (Esfuerzo cíclico) de terremotos con la resistencia del suelo CRR, por Seed e Idriss (1967). Para correlacionar a CRR del suelo con un parámetro in situ se utilizan los ensayos SPT o velocidad de la onda de corte versus una visión general del enfoque basado en esfuerzos causado por estos ensayos.

Previo a los cálculos que se deben llevar a cabo para el análisis de licuación, y el ensayo SPT, se debe realizar de acuerdo a la normativa (ASTM D1586 - 11), para el efecto se desarrollan las siguientes actividades.

1. Obtención de las coordenadas geográficas de cada perforación y profundidad de las mismas.
2. Medición de la elevación del terreno (cota) y la profundidad del nivel freático (*NF*) en el sitio de la perforación por medio de la topografía del sitio.
3. Registrar el diámetro del pozo de excavación, el porcentaje de nivel de energía (*ER*) aplicada al martillo para el Ensayo de

penetración estándar SPT, y la extensión de barra sobre el terreno.

4. Medir el número de golpes (N) de cada muestra.

Para los ensayos de laboratorio previo a la realización de los perfiles estratigráficos, se realizan los siguientes ensayos en base a las especificaciones correspondientes:

Tabla VIII. Ensayos de Laboratorio

| ENSAYO | PROCEDIMIENTO |
|--|--------------------------|
| Contenido de humedad | ASTM-D-2216 |
| Material menor Tamiz N°200 | ASTM-D-1140 |
| Limite líquido, plástico e Índice de plasticidad | ASTM-D-4318- Método A |
| Clasificación de los suelos | ASTM-D-2487 |
| Compresión sin confinar | ASTM-D-2166 |

Fuente: Cordero, M., Torr , M., 2017

Es importante así mismo determinar la magnitud de momento M y aceleración horizontal máxima PGA del sismo de diseño para cada una de las zonas del sitio de estudio mediante el análisis de respuesta de sitio correspondiente.

Una vez realizados los pasos generales previos, se procede al cálculo de los siguientes factores listados a continuación.

4.2.1 Resistencia Cíclica (CRR)

El valor de CRR se correlaciona con las resistencias de penetración de los ensayos SPT.

Para el ensayo de SPT, las diversas correcciones a realizar para llegar a la forma estándar, es el valor de $(N_1)_{60}$ normalizado para una presión aproximada de $10T/m^2$ y una energía eficaz del golpeo del 60% resumido en Idriss y Boulanger (2008, 2010).

Resistencia de penetración para ensayos SPT se corrigen por los efectos del esfuerzo de sobrecarga como:

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Dónde:

C_N = factor de corrección de sobrecarga.

P_a = presión atmosférica.

$(N_1)_{60}$ son las resistencias de penetración que se obtendrían en la misma arena a una sobrecarga de 1 atm si todos otros atributos permanecen constantes.

El valor de CRR del suelo depende de la duración de la sacudida (que se expresa a través de un terremoto con factor de escala de magnitud, MSF) y estrés de sobrecarga efectivo (expresado a través del factor k_σ).

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{v=1}} * MSF * K_\sigma \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde:

MSF: Factor de magnitud de escala

Existe una corrección de la ecuación por contenido de finos FC para los suelos cohesivos, para N160, siendo la siguiente ecuación:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{v=1}} = f[(N1)_{60}, FC] \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde se obtiene la ecuación final a usar para valores SPT:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_{v=1}} = \exp\left(\frac{(N1)_{60CS}}{14.1} + \left(\frac{(N1)_{60CS}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N1)_{60CS}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N1)_{60CS}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

4.2.2 Razón de Esfuerzo Cortante Cíclico

La razón de esfuerzo cíclico (CRS) inducido por el sismo, a cierta profundidad z , es calculada usando la ecuación:

$$CSR_{M, \sigma'_v} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Dónde:

τ_{max} Representa el esfuerzo cortante inducido por el máximo sismo.

σ'_v El esfuerzo vertical efectivo.

Sin embargo, Seed-Idriss nos proporcionan un método simplificado para obtener el esfuerzo cortante máximo, el cual está dado por la siguiente ecuación:

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Dónde:

a_{max}/g Representa la aceleración máxima horizontal al suelo.

r_d : factor de reducción del esfuerzo cortante.

Para suelos sin cohesión incluye cuatro funciones de correlaciones, que describen aspectos fundamentales de la respuesta dinámica del sitio, la resistencia a la penetración, el suelo sus características y comportamiento. Estas cuatro funciones, junto con los principales factores que afectan a cada una, los cuales son: r_d , C_N , k_σ y MSF. (Boulanger & Idriss, 2014)

Para el cálculo de la aceleración máxima horizontal, se utilizó el factor z , obtenido de la Figura 4-1, considerando la zona sísmica

V (Ciudad de Guayaquil). De la tabla V, se seleccionó el tipo de Suelo "E", ya que en el ensayo ReMi, la Velocidad de onda promedio V_s , fue de 170 m/s, lo que permitió calcular el valor de F_a de la Tabla X.

Los suelos tipo E, son todos aquellos perfiles que cumplan con el criterio de velocidad de onda de cortante o V_s menor a 180 m/s. (NEC, 2015)

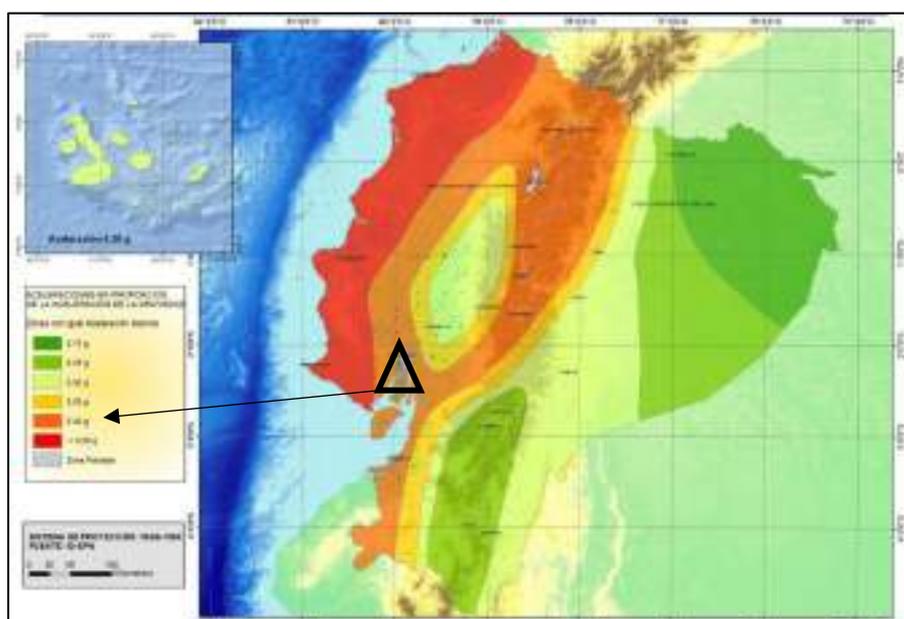


Figura 4.1. Mapa de Peligrosidad Sísmica del Ecuador.
Fuente: NEC, 2015

Tabla IX. Valores del Factor Z en función de la Zona Sísmica Adoptada.

| Zona Sísmica | I | II | III | IV | V | VI |
|--------------------|------|------|------|------|------|-------|
| Valor del 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 |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|

Fuente: NEC, 2015

Tabla X. Tipo de Suelo y Factores de sitio F_a .

| Tipo de Perfil de Suelo | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Factor Z | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | >0.5 |
| A | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 1.4 | 1.3 | 1.25 | 1.23 | 1.2 | 1.18 |
| D | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.25 | 1.2 | 1.12 |
| E | 1.8 | 1.5 | 1.39 | 1.26 | 1.14 | 0.97 |
| F | | | | | | |

Fuente: NEC, 2015

$$a_{max} = z * F_a \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$a_{max} = 0.4 * 1.14 = 0.45g$$

4.2.2.1 Coeficiente de reducción del esfuerzo cíclico cortante (rd)

Este factor es de gran importancia para la evaluación de la probabilidad de licuación del suelo. Es usado para modelar de manera realista las condiciones del suelo, conociendo que este es un soporte deformable y no un cuerpo rígido.

La sismicidad produce esfuerzos cortantes cíclicos y estos esfuerzos a lo largo de la acción del sismo son normalizados como una medida del esfuerzo efectivo inicial normal del suelo teniendo como resultado el valor del CSR tomado en campo y que es inducido por el sismo. (Cetin, Bilge, Wu, Kammerer, & Seed, 2009)

$$r_d = e^{[\alpha(z) + \beta(z) * M]} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \quad (\text{Ec. 4.9})$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Donde z = a la profundidad debajo de la superficie del suelo en metros y los argumentos dentro de los términos de la función seno están en radianes. Las variaciones resultantes de r_d con profundidad y magnitud se muestran en la Gráfica 2.

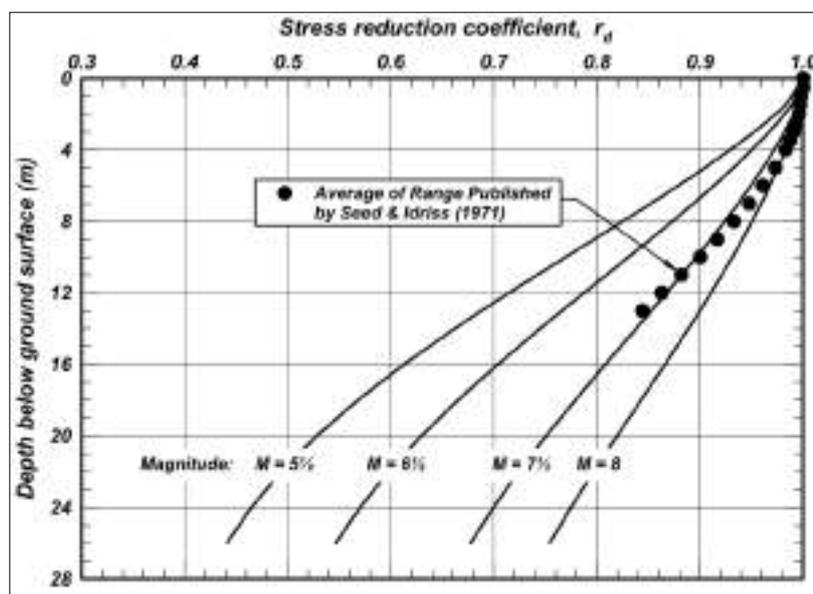


Figura 4.2. Coeficiente de Reducción (r_d).
Fuente: Seed, Idriss, 1971.

4.2.2.2 Factor de corrección por presión de confinamiento C_N

La relación C_N utilizada fue desarrollada inicialmente por Boulanger (2003) y se calcula de la siguiente manera:

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_v}\right)^m \leq 1.7 \quad (\text{Ec. 4.11})$$

$$m = 0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (\text{Ec. 4.12})$$

Con $(N_1)_{60cs} \leq 46$ para poder usarlos en estas ecuaciones.

Dónde:

P_a = Presión atmosférica de 1atm la cual equivale a 101 kPa.

σ'_v = Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo.

$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60}$ corregido por contenido de finos.

$N_{60} = N_{SPT}$ corregido equivalente al 60% de energía.

El cálculo de C_N requiere de iteración numérica, la cual se puede realizar mediante el uso de Microsoft Office Excel.

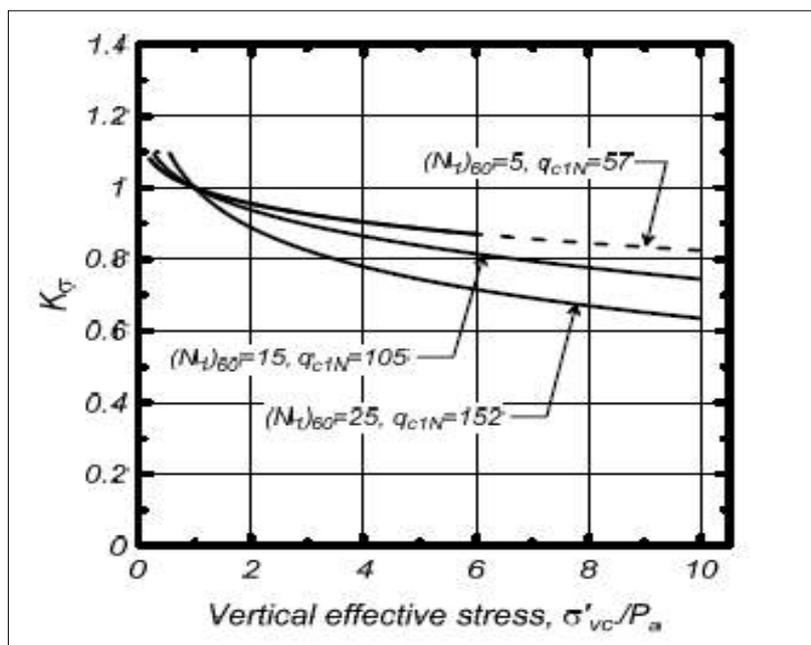


Figura 4.3. Factor de corrección por presión de confinamiento.

Fuente: Boulanger e Idriss, 2014

4.2.2.3 Factor de corrección por esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo k_σ

$$k_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (\text{Ec. 4.13})$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0.3 \quad (\text{Ec. 4.14})$$

Donde:

$\sigma'v$: Esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo.

Pa: Presión atmosférica de 1 atm. Equivalente a 101 kPa

(N1)60cs: (N1)60 corregido por contenido de finos.

4.2.2.4 Factor de Magnitud de Escala (MSF)

Este factor es utilizado para tomar en cuenta los efectos de duración (es decir, el número y las amplitudes relativas de los ciclos de carga). Se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$MSF = 1 + (MSF_{max} - 1) \left(8.64 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 1.325 \right) \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Dónde:

$MSF_{max} = 1.8$ para arenas y 1.09 para arcillas y limos plásticos

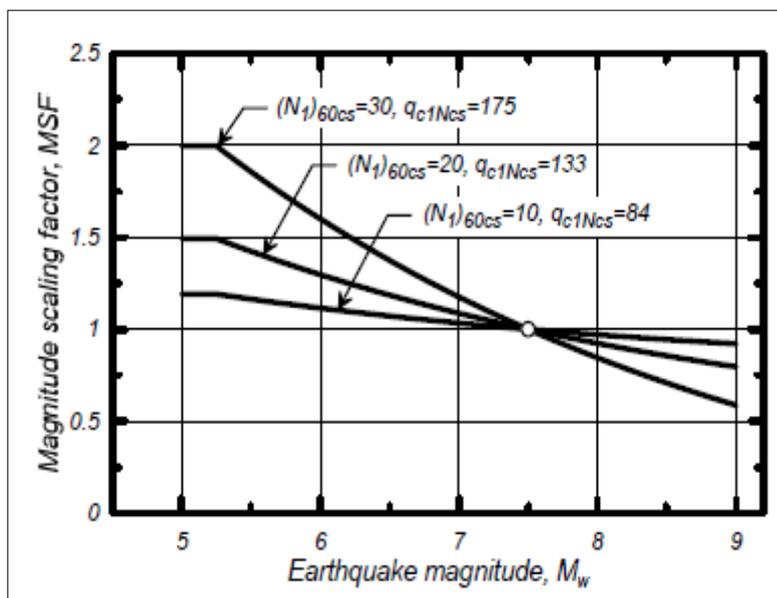


Figura 4.4. Variación de MSF con q_{c1Ncs} y N_{160cs} para suelos cohesivos.

Fuente: Seed R. B., 2010

4.2.2.5 Corrección por contenido de finos

Las historias de casos de licuefacción sugieren que las correlaciones de activación de la licuefacción cuando los suelos no contienen finos, es mayor, a diferencia de un suelo que, si los contenga, presentando mayor resistencia. Es por esto, los valores de SPT para suelos que contienen limos o arcillas el valor de $\Delta(N_1)_{60}$ se deben de corregir.

La expresión para valores de SPT es la siguiente:

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp\left(1.63 - \frac{9.7}{FC+2} - \left(\frac{15.7}{FC+2}\right)^2\right) \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Dónde:

FC= Es el porcentaje de contenido de finos.

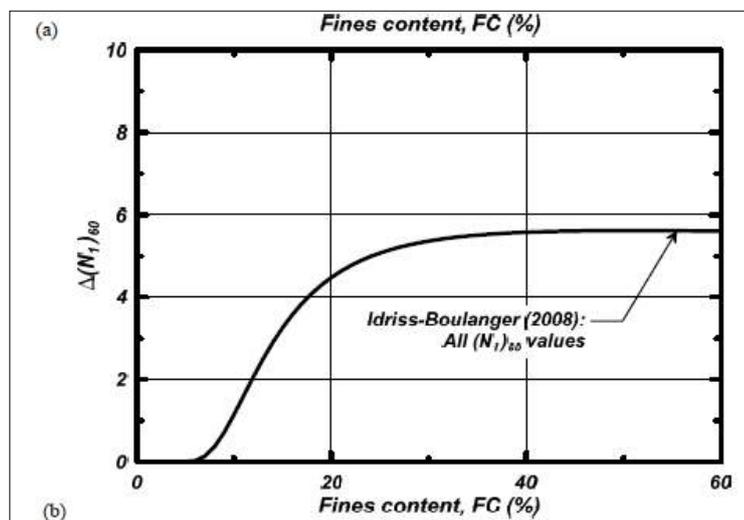


Figura 4.5. Contenido de Finos.
Fuente: Idriss & Boulanger, 2008.

4.2.3 Índice de potencial de licuación (LPI)

El índice de potencial de licuación (LPI) proporciona una integración del potencial de licuación a lo largo de la profundidad de un perfil de suelo y predice el rendimiento de toda la columna del suelo en comparación con una sola capa de suelo a una profundidad determinada y depende de la magnitud de la aceleración horizontal máxima del terreno (Luna & Frost, 1998).

Este índice se interpreta por rangos, será bien bajo el riesgo de licuefacción si $LPI=0$, para valores entre 0-5 los daños en la superficie son bajos, entre 5-15 el riesgo es moderado y para

valores mayores a 15 el riesgo de licuefacción es alto. (Iwasaki, 1978)

Para poder determinar el LPI se utiliza la siguiente ecuación:

$$LPI = \int_0^{20} (10 - 0.5z) F_L dz \quad (\text{Ec. 4.17})$$

$$F_L = 1 - FS_{liq} \text{ para } FS_{liq} < 1 \quad (\text{Ec. 4.18})$$

$$F_L = 0 \text{ para } FS_{liq} \geq 1 \quad (\text{Ec. 4.19})$$

Dónde:

z: Profundidad hasta el punto medio de la capa de suelo en metros.

dz: Incremento diferencial de profundidad.

F_L : Factor de severidad

Se debe considerar las siguientes asunciones según Iwasaki, 1982:

- La severidad de licuación es proporcional al espesor de la capa licuable y a la cercanía de la capa licuable con respecto a la superficie del terreno.
- Se relaciona al factor de seguridad FS. Valores de FS menores a 1 contribuyen al aumento de la severidad.

4.2.4 Factor de seguridad a la licuefacción (FS_{liq})

Este factor es la razón entre el CRR y CRS, el cual valora la susceptibilidad del suelo a sufrir licuefacción. Los valores menores a 1 indican que el suelo es susceptible a licuarse y se lo obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$FS_{liq} = \frac{CRR_{M,\sigma'v}}{CRSM,\sigma'v} \quad (\text{Ec. 4.20})$$

Dónde:

FS_{liq}: Factor de seguridad a la licuefacción

$CRR_{M,\sigma'v}$: Corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo $\sigma'v$.

$CRSM,\sigma'v$: Corregida para una magnitud M y esfuerzo de sobrecarga vertical efectivo $\sigma'v$.

4.2.5 Asentamiento vertical de re-consolidación post-licuación unidimensional

Al ocurrir una re-consolidación del suelo debido a los asentamientos verticales, se llevan a cabo desplazamientos verticales post-licuación, así como la deformación por corte debida a los desplazamientos laterales producidos. Para condiciones de tierra nivelada, dicho asentamiento puede ser calculado usando la

deformación volumétrica. Para el cálculo del asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión (despreciando los movimientos causados por el desplazamiento lateral) y considerando un medio isotrópico, se parte del procedimiento de (Idriss & Boulanger, 2008).

Para el cálculo de la deformación volumétrica se utiliza la siguiente expresión de (Yoshimine, 2006):

$$\varepsilon_v = 1.5 * \exp(-0.369\sqrt{(N_1)_{60cs}}) * \min(0.08, y_{max}) \quad (\text{Ec. 4.21})$$

$$y_{max} = \min\left(y_{lim}, 0.035(2 - FSliq) \left(\frac{1-F_\alpha}{FSliq-F_\alpha}\right)\right) \text{ para } 2 > FSliq > F_\alpha \quad (\text{Ec. 4.22})$$

$$y_{max} = y_{lim} \text{ para } FSliq \leq F_\alpha \quad (\text{Ec. 4.23})$$

$$y_{lim} = 1.859(1.1 - \sqrt{\frac{(N_1)_{60cs}}{46}})^3 ; 0 \leq y_{lim} \leq 0.5 \quad (\text{Ec. 4.24})$$

$$F_\alpha = 0.032 + 0.69\sqrt{(N_1)_{60cs}} - 0.13(N_1)_{60cs}; N_{160cs} \geq 7 \quad (\text{Ec. 4.25})$$

Donde:

ε_v Deformación volumétrica de re-consolidación post licuefacción.

N_{160cs} : N_{160} corregido por contenido de finos.

$y_{m\acute{a}x}$: Deformación de cizallamiento máxima.

γ_{lim} : Deformación de cizallamiento limitante.

$F\alpha$: Término de modificación de FSliq.

Para la estimación del asentamiento en la superficie se utilizará la siguiente expresión:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_{max} dz \quad (\text{Ec. 4.26})$$

Donde:

S_{v-1D} : Asentamiento vertical de re-consolidación en una dimensión.

dz : Incremento diferencial de la profundidad.

4.3 Análisis de los resultados de licuefacción de suelos a través del ensayo SPT

Se procedió a calcular el Factor de seguridad de licuefacción de las perforaciones, utilizando las fórmulas propuestas por el método de (Boulanger & Idriss, 2014).

Como se observa en la Tabla VII, todos los estratos hasta los 20.17 metros de profundidad, tienen un factor de seguridad de licuación menor a 1, lo que indica que son potencialmente licuables, mientras que las dos últimas muestras, tienen un factor de seguridad mayor a 1, por lo tanto, no fueron objeto de análisis. Por otro lado, sólo se consideró los estratos

entre los primeros 15 metros, ya que, bajo dicha profundidad, existe suficiente espesor para que no se produzca la licuefacción.

La tabla VIII, contiene los estratos analizados de la perforación B, la cual muestra que todos los estratos tienen un FS_{liq} menor a 1, por lo que todos son potencialmente licuables, y de igual forma que con la perforación E, sólo fue objeto de análisis el estrato dentro de los primeros 15 metros de profundidad.

A continuación, se analizó la perforación C, misma que contiene 3 estratos que cumplen con las características requeridas para ser analizados.

Por último, la perforación G, presentó todos sus estratos, con un factor de seguridad contra la licuefacción inferior a 1, por lo que son susceptibles a la licuefacción, pero solo fue objeto de estudio, el primer estrato, ya que se encuentra sobre los 15 metros de profundidad anteriormente mencionados.

Tabla XI. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación E.

| z [m] | SUCS | IP | LL | w% | FC % | σ_v [T/m ²] | σ'_v [T/m ²] | a _{max/g} | N60 | N ₆₀ (cs) | α | β | rd | m | CN | C σ ≤ 0.3 | K σ ≤ 1.1 | CRR | CSR | FS | POTENCIAL |
|-------|------|----|----|----|------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----|-------------------------|----------|---------|------|------|------|--------------------------|--------------------------|------|------|------|-------------|
| 5.3 | SM | 0 | 0 | 37 | 17 | 9.7 | 6.1 | 0.45 | 13 | 17.9 | -0.29 | 0.03 | 0.96 | 0.46 | 1.26 | 0.12 | 1.06 | 0.18 | 0.45 | 0.41 | LICUABLE |
| 5.5 | ML | 0 | 0 | 90 | 94 | 10.0 | 6.2 | 0.45 | 2 | 7.2 | -0.30 | 0.03 | 0.96 | 0.58 | 1.33 | 0.08 | 1.04 | 0.10 | 0.45 | 0.22 | LICUABLE |
| 7.4 | SM | 0 | 0 | 30 | 21 | 13.7 | 7.9 | 0.45 | 3 | 5.6 | -0.45 | 0.05 | 0.93 | 0.60 | 1.16 | 0.08 | 1.02 | 0.09 | 0.47 | 0.19 | LICUABLE |
| 14 | SM | 0 | 0 | 33 | 20 | 26.1 | 13.8 | 0.45 | 4 | 5.2 | -1.06 | 0.12 | 0.84 | 0.61 | 0.81 | 0.08 | 0.98 | 0.09 | 0.46 | 0.19 | LICUABLE |
| 16 | ML | 12 | 39 | 27 | 55 | 30.1 | 15.7 | 0.45 | 6 | 8.6 | -1.25 | 0.14 | 0.81 | 0.56 | 0.76 | 0.09 | 0.96 | 0.11 | 0.45 | 0.24 | LICUABLE |
| 17.5 | SM | 0 | 0 | 37 | 20 | 32.8 | 17.0 | 0.45 | 15 | 12.9 | -1.39 | 0.15 | 0.79 | 0.51 | 0.73 | 0.10 | 0.95 | 0.14 | 0.44 | 0.31 | LICUABLE |
| 20.17 | SM | 0 | 0 | 24 | 20 | 38.1 | 19.6 | 0.45 | 64 | 50.9 | -1.62 | 0.18 | 0.75 | 0.24 | 0.76 | >0.3 | 0.05 | - | 0.43 | >>1 | NO LICUABLE |
| 20.8 | SM | 0 | 0 | 19 | 18 | 39.4 | 20.3 | 0.45 | 76 | 59.0 | -1.67 | 0.18 | 0.74 | 0.19 | 0.75 | >0.3 | >1.1 | - | 0.42 | >>1 | NO LICUABLE |

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

Tabla XII. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación B.

| z [m] | SUCS | IP | LL | w% | FC % | σ_v [T/m ²] | σ'_v [T/m ²] | $\frac{a}{\max/g}$ | N6 0 | N1 60 (cs) | α | β | rd | m | CN | $C\sigma$ ≤ 0.3 | $K\sigma$ ≤ 1.1 | CRR | CSR | FS | POTENCIAL |
|----------|------|----|----|-----|---------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|---------|---------------|----------|---------|------|------|------|-------------------------|-------------------------|------|------|------|-----------|
| 11.5 | SM | 0 | 0 | 44 | 41 | 20.1 | 10.1 | 0.4 | 4 | 7.54 | -0.822 | 0.092 | 0.87 | 0.57 | 0.99 | 0.08 | 1.00 | 0.10 | 0.45 | 0.22 | LICUABLE |
| 18.5 | SC | 14 | 37 | 44 | 37 | 32.4 | 15.4 | 0.4 | 12 | 12.90 | -1.478 | 0.162 | 0.77 | 0.51 | 0.79 | 0.10 | 0.96 | 0.14 | 0.42 | 0.33 | LICUABLE |
| 18.5 | SM | 0 | 0 | 40 | 26 | 32.4 | 15.4 | 0.4 | 5 | 6.47 | -1.478 | 0.162 | 0.77 | 0.59 | 0.77 | 0.08 | 0.97 | 0.09 | 0.42 | 0.22 | LICUABLE |
| 20.5 | Pt | 0 | 0 | 222 | 25 | 34.9 | 15.9 | 0.4 | 0 | 2.54 | -1.645 | 0.18 | 0.74 | 0.66 | 0.74 | 0.07 | 0.97 | 0.07 | 0.42 | 0.17 | LICUABLE |
| 23.5 | CL | 20 | 41 | 27 | 55 | 40.8 | 18.8 | 0.4 | 7 | 8.78 | -1.86 | 0.201 | 0.71 | 0.56 | 0.68 | 0.09 | 0.94 | 0.11 | 0.40 | 0.28 | LICUABLE |
| 24.5 | SM | 0 | 0 | 31 | 27 | 42.7 | 19.7 | 0.4 | 13 | 11.32 | -1.92 | 0.207 | 0.69 | 0.53 | 0.66 | 0.10 | 0.93 | 0.13 | 0.39 | 0.33 | LICUABLE |
| 28.5 | CL | 18 | 39 | 38 | 59 | 50.0 | 23.0 | 0.4 | 17 | 14.65 | -2.091 | 0.222 | 0.65 | 0.49 | 0.62 | 0.11 | 0.91 | 0.15 | 0.37 | 0.42 | LICUABLE |
| 30.5 | SM | 0 | 0 | 23 | 15 | 54.0 | 25.0 | 0.4 | 28 | 17.16 | -2.13 | 0.224 | 0.64 | 0.47 | 0.57 | 0.12 | 0.89 | 0.18 | 0.36 | 0.49 | LICUABLE |
| 37.5 | SM | 0 | 0 | 40 | 26 | 66.5 | 30.5 | 0.4 | 26 | 16.03 | -2.013 | 0.203 | 0.61 | 0.48 | 0.51 | 0.12 | 0.87 | 0.16 | 0.35 | 0.48 | LICUABLE |
| 40.5 | SM | 0 | 0 | 26 | 17 | 72.4 | 33.4 | 0.4 | 26 | 13.87 | -1.85 | 0.181 | 0.61 | 0.50 | 0.47 | 0.11 | 0.87 | 0.15 | 0.35 | 0.42 | LICUABLE |

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

Tabla XIII. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación C.

| z [m] | SUCS | IP | LL | w% | FC % | σ_v [T/m ²] | σ'_v [T/m ²] | a max/g | N60 | N1 60 (cs) | α | β | rd | m | CN | $C\sigma \leq 0.3$ | $K\sigma \leq 1.1$ | CRR | CSR | FS | POTENCIAL |
|-------|------|----|----|----|------|--------------------------------|---------------------------------|---------|-----|------------|----------|---------|------|------|------|--------------------|--------------------|-------|------|--------|-------------|
| 6.35 | SM | 17 | 37 | 32 | 50 | 12.1 | 6.9 | 0.4 | 6 | 11.18 | -0.37 | 0.04 | 0.94 | 0.53 | 1.22 | 0.10 | 1.04 | 0.13 | 0.43 | 0.29 | LICUABLE |
| 8.45 | SM | 0 | 0 | 36 | 23 | 16.0 | 8.6 | 0.4 | 11 | 14.16 | -0.54 | 0.06 | 0.92 | 0.49 | 1.08 | 0.11 | 1.02 | 0.15 | 0.33 | 0.46 | LICUABLE |
| 14.45 | SM | 0 | 0 | 39 | 25 | 26.7 | 13.4 | 0.4 | 13 | 13.79 | -1.1 | 0.12 | 0.83 | 0.50 | 0.87 | 0.11 | 0.97 | 0.15 | 0.29 | 0.51 | LICUABLE |
| 15.95 | SM | 0 | 0 | 44 | 27 | 29.3 | 14.5 | 0.4 | 25 | 24.20 | -1.25 | 0.14 | 0.81 | 0.41 | 0.86 | 0.16 | 0.94 | 0.27 | 0.26 | 1.06 | NO LICUABLE |
| 17.45 | SM | 0 | 0 | 33 | 24 | 32.1 | 15.8 | 0.4 | 5 | 6.26 | -1.38 | 0.15 | 0.79 | 0.59 | 0.76 | 0.08 | 0.96 | 0.09 | 0.24 | 0.39 | LICUABLE |
| 17.9 | SM | 0 | 0 | 25 | 13 | 33.0 | 16.2 | 0.4 | 6 | 5.36 | -1.43 | 0.16 | 0.78 | 0.61 | 0.74 | 0.08 | 0.96 | 0.09 | 0.23 | 0.39 | LICUABLE |
| 22.2 | SM | 0 | 0 | 19 | 17 | 41.9 | 20.8 | 0.4 | 88 | 8.59 | -1.77 | 0.19 | 0.72 | 0.56 | 0.08 | 0.09 | 0.94 | 0.11 | 0.21 | 0.52 | LICUABLE |
| 22.4 | ML | 0 | 0 | 30 | 74 | 42.3 | 21.0 | 0.4 | 68 | 15.86 | -1.79 | 0.19 | 0.72 | 0.48 | 0.17 | 0.11 | 0.92 | 0.16 | 0.21 | 0.80 | LICUABLE |
| 24.35 | SM | 0 | 0 | 28 | 12 | 46.1 | 22.8 | 0.4 | 85 | 9.23 | -1.91 | 0.21 | 0.70 | 0.55 | 0.10 | 0.09 | 0.93 | 0.11 | 0.20 | 0.57 | LICUABLE |
| 26.9 | SC | 19 | 37 | 30 | 44 | 50.9 | 25.1 | 0.4 | 36 | 29.29 | -2.04 | 0.22 | 0.67 | 0.37 | 0.71 | 0.20 | 0.82 | 0.44 | 0.19 | 2.36 | NO LICUABLE |
| 29 | SM | 0 | 0 | 25 | 13 | 55.0 | 27.1 | 0.4 | 57 | 44.42 | -2.1 | 0.22 | 0.65 | 0.27 | 0.76 | 0.53 | 0.48 | 23.61 | 0.18 | 129.99 | NO LICUABLE |
| 30.45 | SM | 0 | 0 | 29 | 16 | 57.8 | 28.5 | 0.4 | 52 | 37.27 | -2.13 | 0.22 | 0.64 | 0.32 | 0.69 | 0.30 | 0.69 | 1.87 | 0.18 | 10.56 | NO LICUABLE |
| 35.4 | MH | 20 | 53 | 43 | 84 | 66.6 | 32.3 | 0.4 | 55 | 44.49 | -2.09 | 0.21 | 0.61 | 0.27 | 0.73 | 0.53 | 0.38 | 24.41 | 0.17 | 142.72 | NO LICUABLE |

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

Tabla XIV. Tabla de Resultados de muestras pertenecientes a la perforación G.

| z [m] | SUCS | IP | LL | w% | FC % | σ_v [T/m ²] | σ'_v [T/m ²] | a max/g | N60 | N1 60 (cs) | α | β | rd | m | CN | $C_\sigma \leq 0.3$ | $K_\sigma \leq 1.1$ | CRR | CSR | FS | POTENCIAL |
|-------|------|----|----|----|------|--------------------------------|---------------------------------|---------|-----|------------|----------|---------|------|------|------|---------------------|---------------------|------|------|------|-------------|
| 9.5 | SM | 0 | 0 | 50 | 36 | 16.2 | 8.7 | 0.4 | 5 | 8.76 | -0.64 | 0.07 | 0.90 | 0.56 | 1.08 | 0.09 | 1.01 | 0.11 | 0.44 | 0.25 | LICUABLE |
| 16.5 | SM | 0 | 0 | 41 | 31 | 28.5 | 14.0 | 0.4 | 15 | 15.78 | -1.3 | 0.14 | 0.80 | 0.48 | 0.85 | 0.11 | 0.96 | 0.16 | 0.31 | 0.53 | LICUABLE |
| 21.5 | CL | 14 | 34 | 30 | 55 | 38.2 | 18.7 | 0.4 | 32 | 29.36 | -1.72 | 0.19 | 0.73 | 0.37 | 0.79 | 0.20 | 0.88 | 0.45 | 0.25 | 1.76 | NO LICUABLE |
| 25.5 | SM | 0 | 0 | 24 | 12 | 46.2 | 22.7 | 0.4 | 32 | 23.59 | -1.97 | 0.21 | 0.68 | 0.41 | 0.71 | 0.15 | 0.87 | 0.26 | 0.23 | 1.15 | NO LICUABLE |
| 29.5 | CL | 19 | 40 | 46 | 81 | 53.2 | 25.7 | 0.4 | 32 | 26.51 | -2.11 | 0.22 | 0.65 | 0.39 | 0.69 | 0.17 | 0.84 | 0.33 | 0.21 | 1.58 | NO LICUABLE |
| 31.5 | SM | 0 | 0 | 31 | 48 | 57.0 | 27.5 | 0.4 | 34 | 26.72 | -2.14 | 0.22 | 0.63 | 0.39 | 0.67 | 0.17 | 0.82 | 0.34 | 0.20 | 1.70 | NO LICUABLE |
| 40 | SM | 0 | 0 | 28 | 14 | 73.4 | 35.4 | 0.4 | 32 | 19.17 | -1.88 | 0.19 | 0.61 | 0.45 | 0.57 | 0.13 | 0.84 | 0.20 | 0.20 | 1.00 | NO LICUABLE |

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

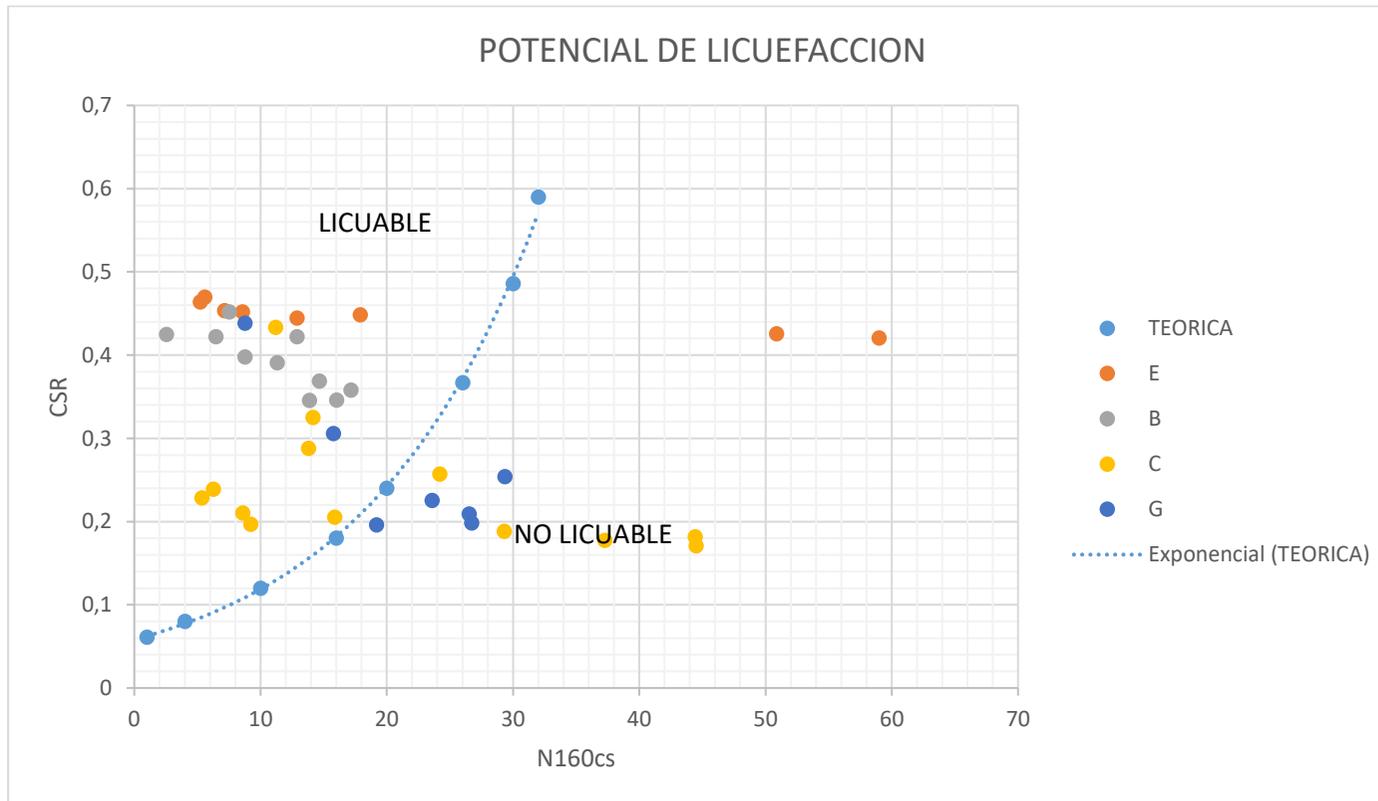


Figura 4.6. Curva patrón de Boulanger e Idriss con CSR para M=7.5 y Pa=1atm, para análisis de las muestras del proyecto PTAR Las Esclusas.

Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

En la figura 4.6. se observan las 38 muestras susceptibles a licuarse, mismas que pertenecen a las perforaciones B, C, E y G. Se tomó el coeficiente de esfuerzo cíclico vs el número de golpes corregido por contenido de finos de cada una de las muestras y se graficó, considerando la curva patrón propuesta por (Boulanger & Idriss, 2014), considerando un sismo de magnitud de 7.5 con una presión atmosférica de 1 atm.

4.4 Resumen de resultados global del estudio de licuación de suelos

Para la Tabla XI, se consideró una vez culminado el análisis del potencial de licuefacción, aquellos estratos que tuviesen una profundidad máxima de 15m, como propuso (Boulanger & Idriss, 2014), lo cual permitió segregar aquellas muestras que a pesar de tener un factor de seguridad de licuación menor a 1, no se encontraban a una profundidad en el rango de riesgo para la estructura. Con los valores obtenidos de LPI se analizó la severidad de este fenómeno, en el caso de presentar valores mayores a 15, el riesgo de posibles afectaciones en la estructura es alto. Se puede apreciar también que para valores lejanos a la superficie con profundidades superiores a 10m, este índice tiende a disminuir considerablemente.

Tabla XV. Resumen de los resultados obtenidos en la PTAR.

| Ensayo | Prof. z[m] | NF [m] | SUCS | POTENCIAL | FSliq | LPI | S _{v-1D} [cm] |
|--------|------------|--------|------|-----------|-------|-------|------------------------|
| E | 5.3 | 1.66 | SM | LICUABLE | 0.41 | 86.7 | 2.34 |
| E | 5.5 | 1.66 | ML | LICUABLE | 0.22 | 113 | 6.67 |
| E | 7.4 | 1.66 | SM | LICUABLE | 0.19 | 102 | 17.02 |
| E | 14 | 1.66 | SM | LICUABLE | 0.19 | 48.6 | 36.65 |
| B | 11.5 | 1.5 | SM | LICUABLE | 0.22 | 66.3 | 2.09 |
| C | 6.35 | 1.10 | SM | LICUABLE | 0.29 | 96.9 | 0.92 |
| C | 8.45 | 1.10 | SM | LICUABLE | 0.46 | 62.37 | 1.98 |
| C | 14.45 | 1.10 | SM | LICUABLE | 0.51 | 27.2 | 3.81 |
| G | 9.5 | 2.0 | SM | LICUABLE | 0.25 | 78.7 | 1.59 |

Fuente: Cordero, M., Torre, M., 2017

La tabla XV expone las perforaciones potencialmente licuables, hasta los 15 metros de profundidad, así como su nivel freático, el tipo de suelo, el factor de seguridad de licuefacción, el índice de potencial de licuefacción y los asentamientos en una dirección post-licuefacción. La mayoría de los estratos están conformados por arena limosa y mostraron valores de LPI considerablemente mayores a 15, por lo que la severidad de licuefacción es elevada en dichas perforaciones. Por otro lado, los asentamientos expuestos en la tabla son acumulativos, la perforación B se asentó 2.09 cm, la C 6.9 cm, la E 36.9 cm y la G 1.59 cm, por licuefacción.

CAPITULO 5

PRESENTACIÓN DE MAPAS DE LICUEFACCIÓN

5.1 Mapas de Potencial de Licuefacción

Para la creación de los mapas del potencial de licuefacción, se crearon capas en el software ArcGis para profundidades determinadas tales como, 1m, 3m, 5m, 10m, 15m, 18m. Dichos valores fueron seleccionados debido a que una de las características del fenómeno de licuefacción es que este sucede a profundidades máximas de 15m.

Para las diferentes perforaciones realizadas y analizadas en el presente proyecto, y para cada capa creada se le asignó el respectivo valor de índice plástico, CRR, CSR, permitiendo obtener el factor de seguridad por licuefacción.

Se puede observar a partir de la Figura 5.1 hasta la Figura 5.7. que el FSliq se muestra por rangos aquellas capas que según su IP fue menor a 20 y el FSliq menor a 1, en una gama de colores desde verde hasta rojo.

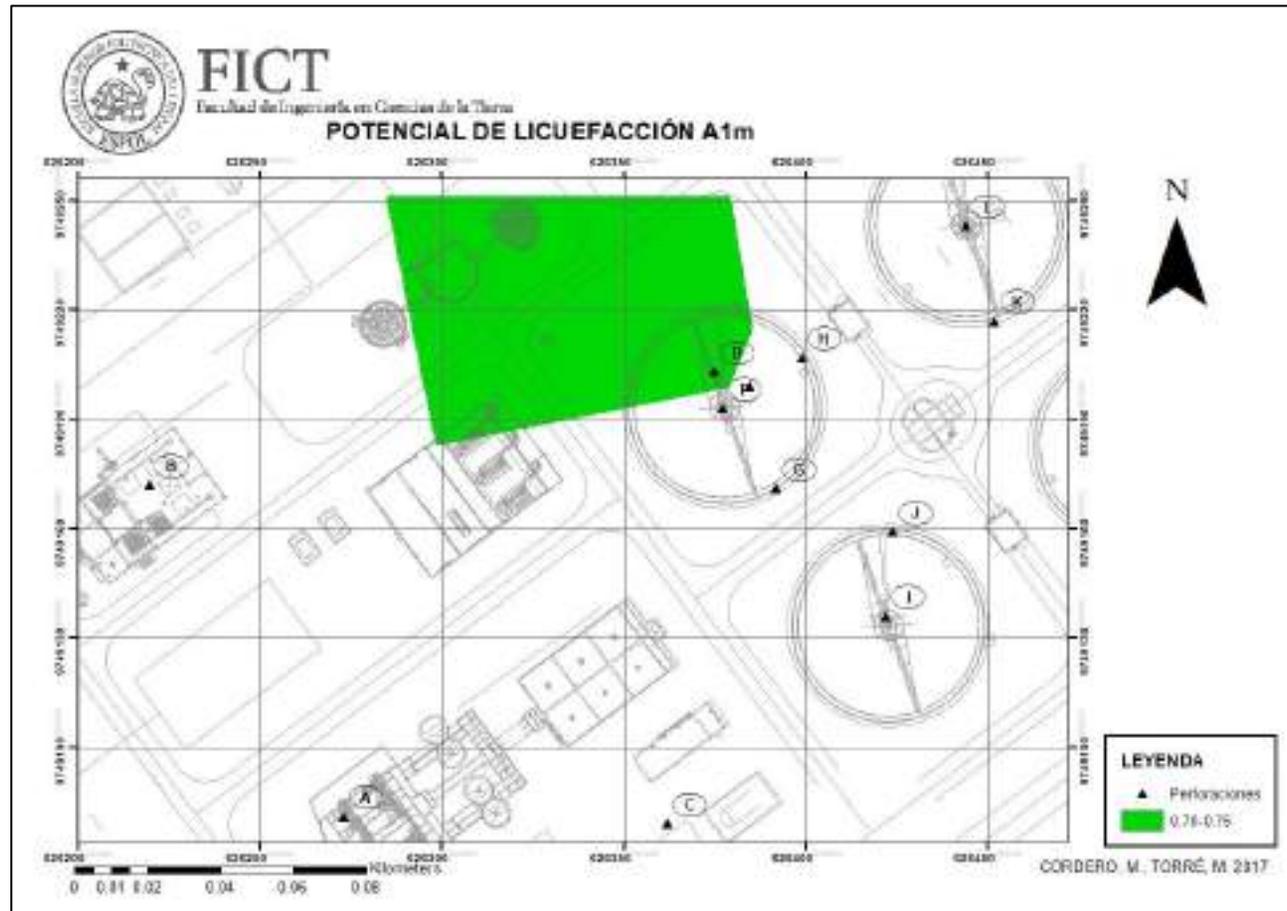


Figura 5.1. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 1m de profundidad.
Fuente: Cordero, M., Torre M. 2017

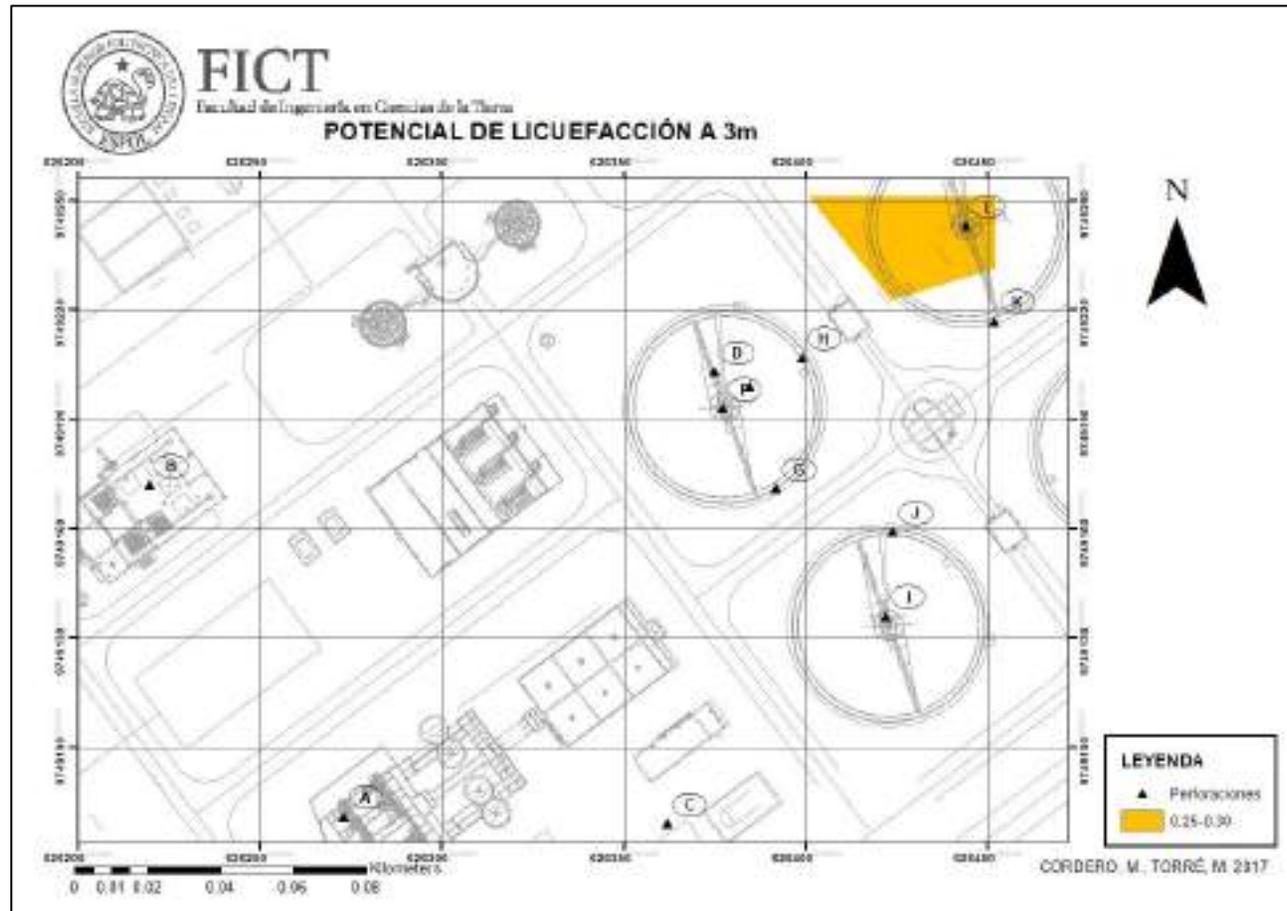


Figura 5.2. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 3m de profundidad.

Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

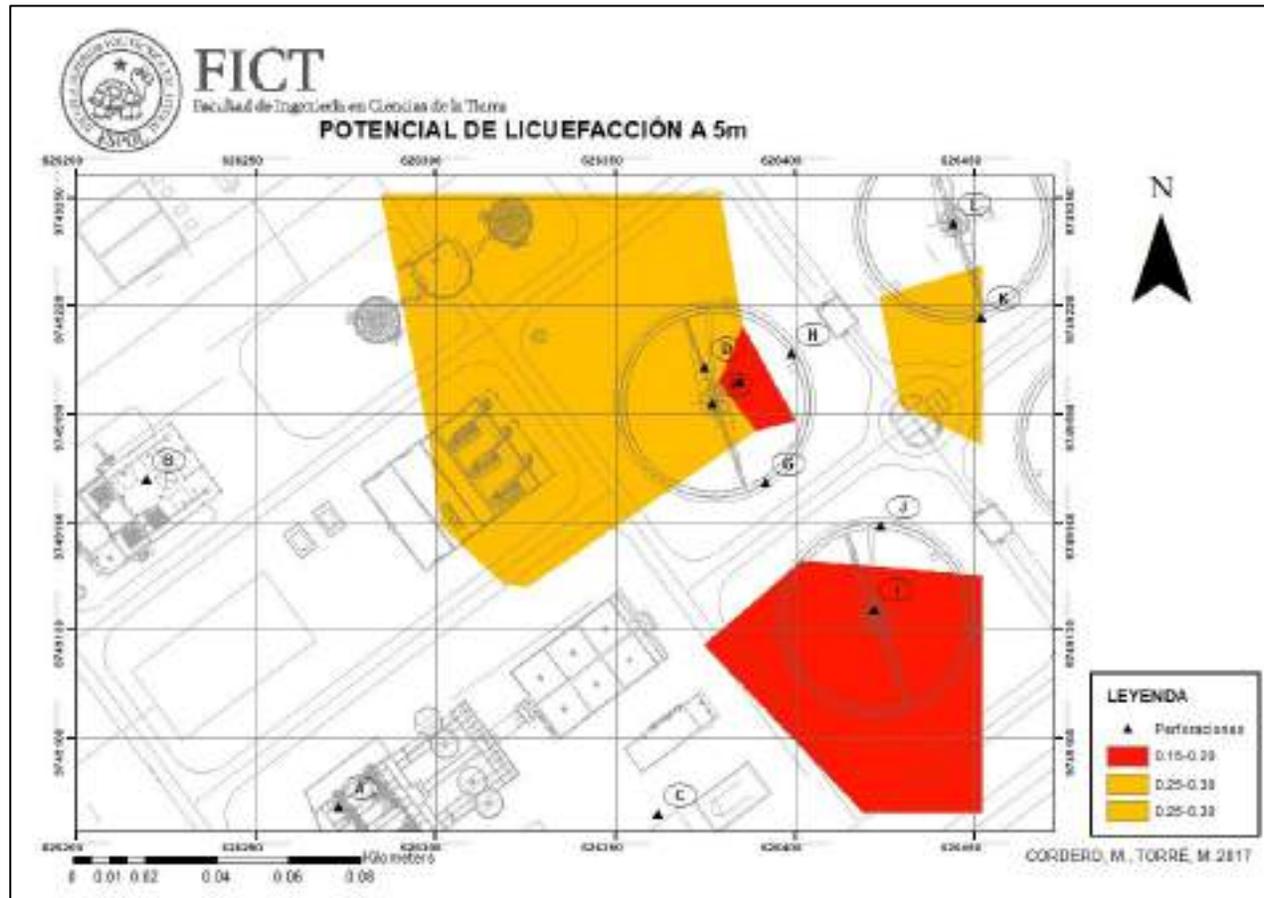


Figura 5.3. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 5m de profundidad.

Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

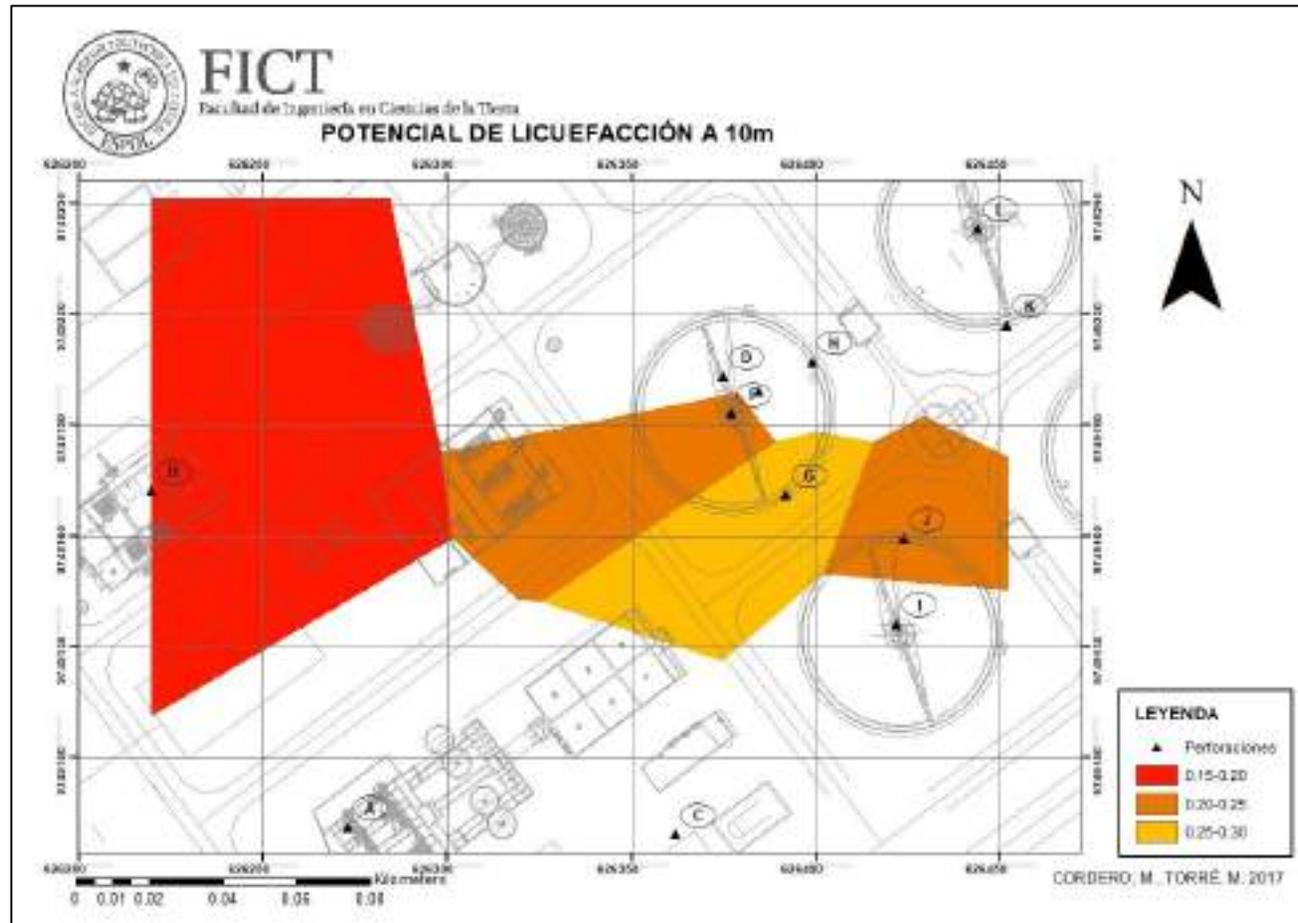


Figura 5.4. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 10m de profundidad.
Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

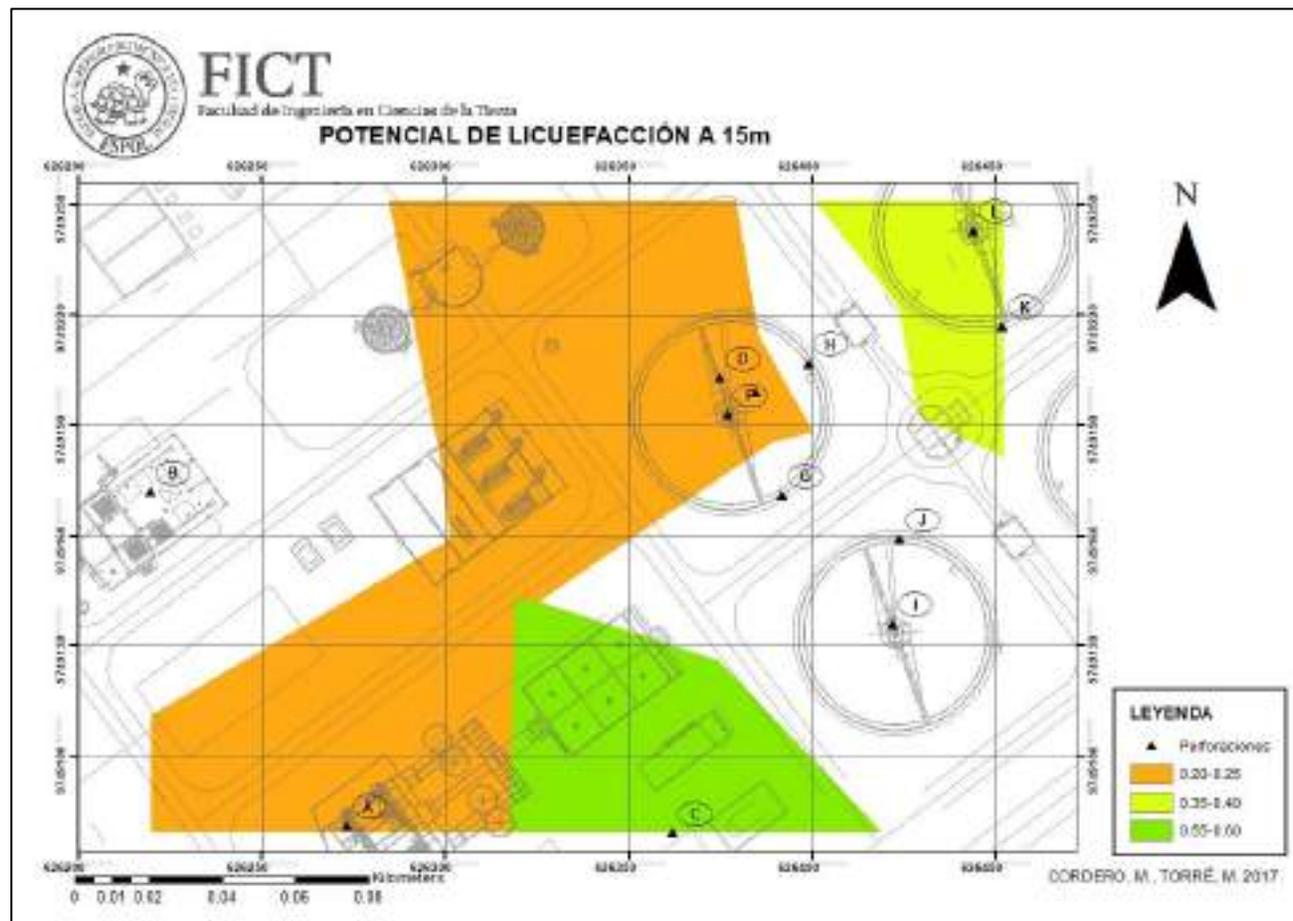


Figura 5.5. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 15m de profundidad.
Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

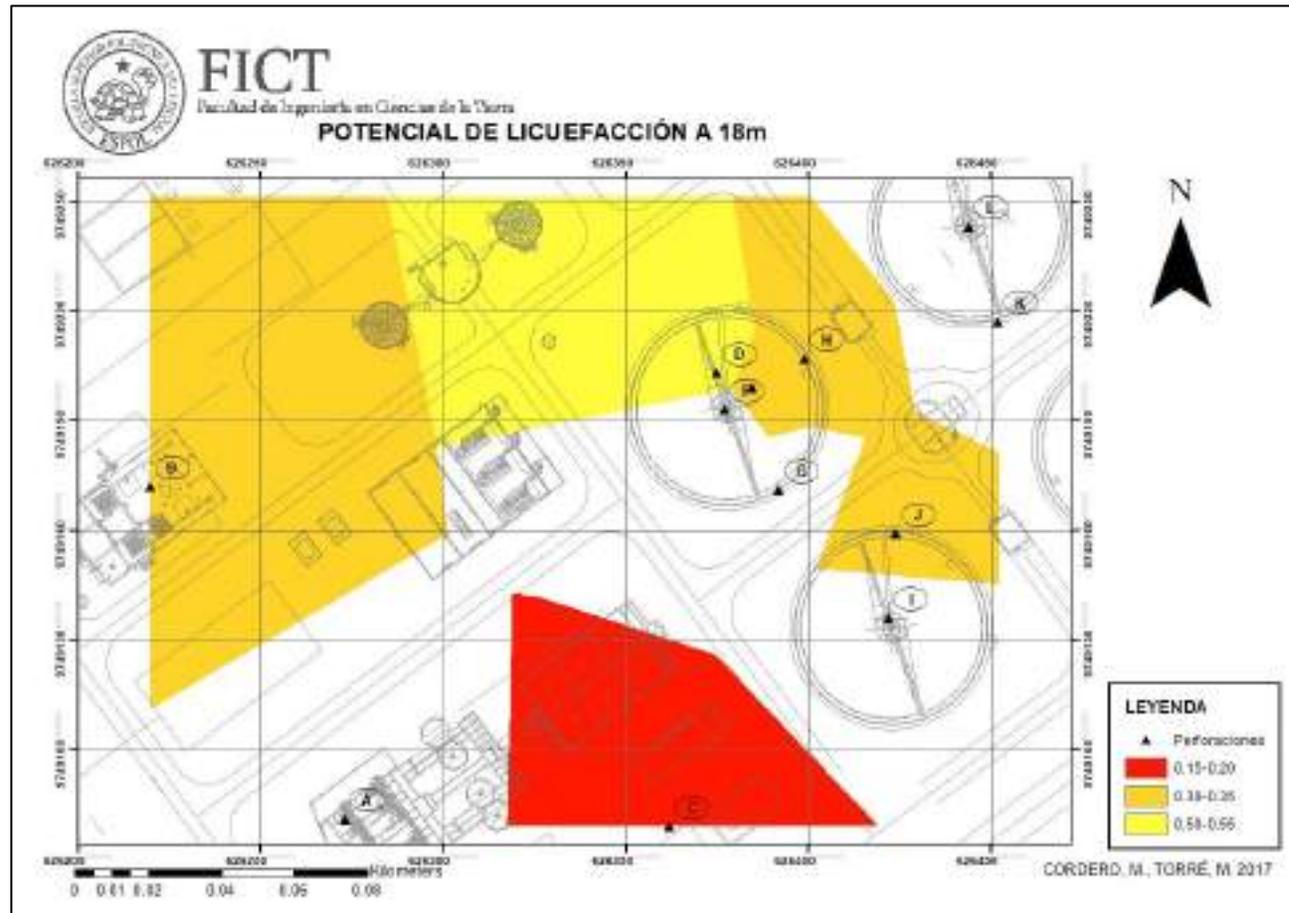


Figura 5.6. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción a 18m de profundidad.
Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

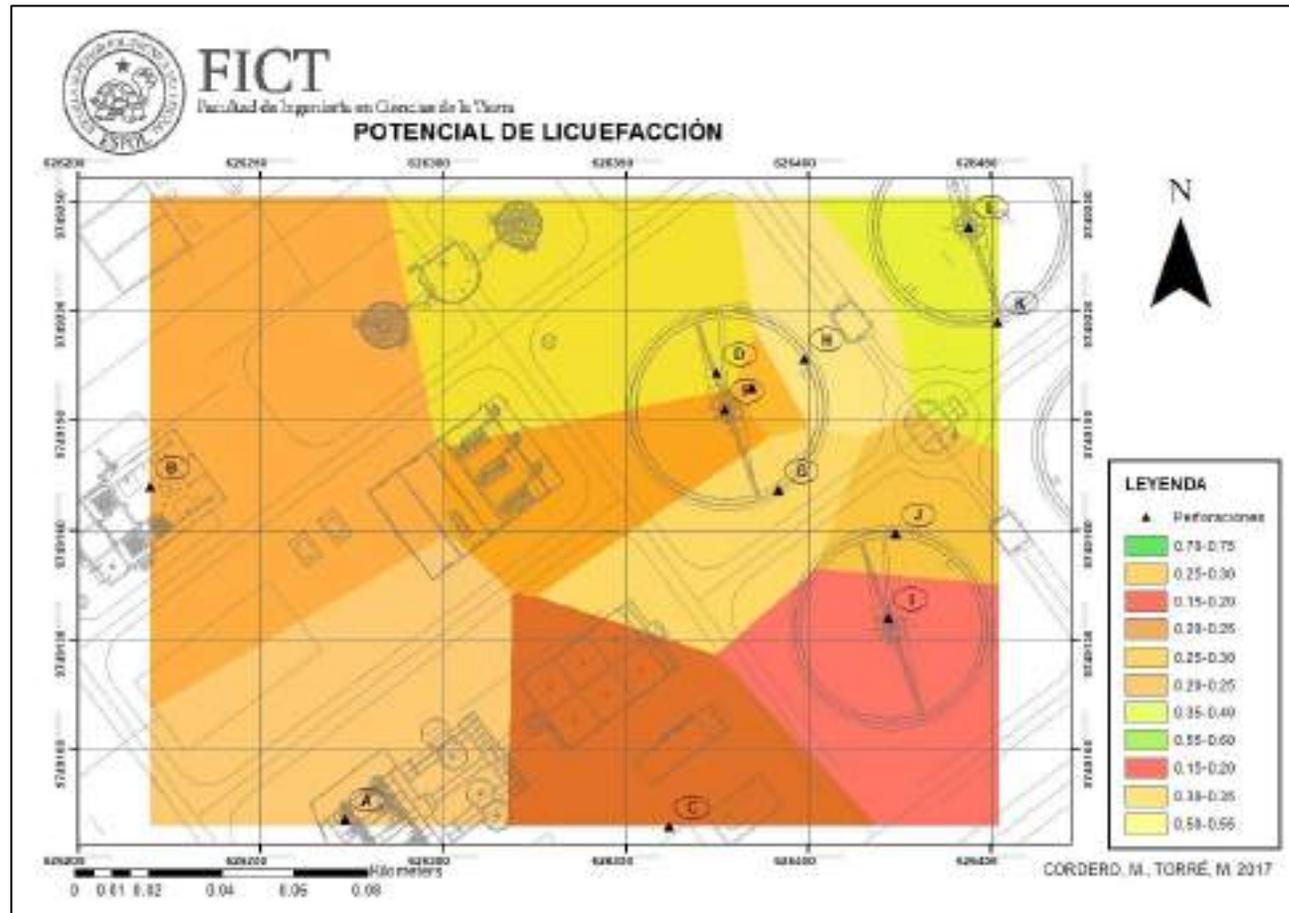


Figura 5.7. Mapa representativo del Potencial de Licuefacción para cada Perforación.
Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

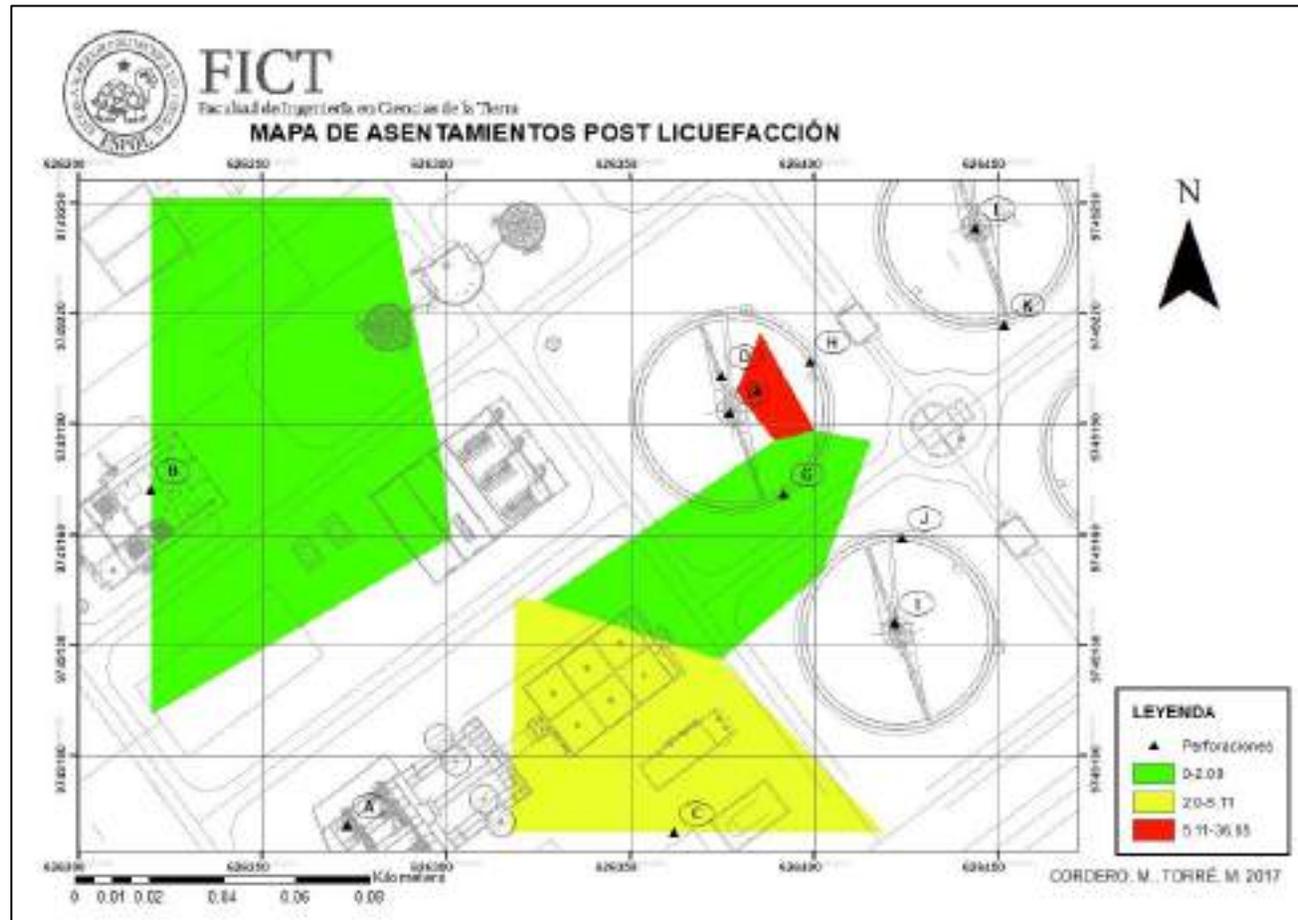


Figura 5.8. Mapa representativo de los asentamientos post-licuefacción.
Fuente: Cordero, M., Torre, M. 2017

La figura 5.1. muestra el potencial de licuefacción a 1 m de profundidad del área de estudio, en la misma, se pudo observar que la perforación D y su área de influencia se encuentra sombreada de color verde, lo cual indicó, que el Factor de seguridad de licuefacción estuvo entre 0.70 y 0.75.

El FSliq, denotado con color anaranjado claro, en la figura 5.2., se ubicó entre 0.25-0.30, lo que indicó que la perforación L y su entorno, presentaron un potencial de licuefacción más crítico, en comparación a las demás perforaciones a 3 metros de profundidad. Por otro lado, a 5 metros, existe un FSliq crítico alrededor de la perforación I, dicho factor es menor debido a que a esa profundidad se encuentra un lente de arena de espesor 50cm el cual no fue considerado en el análisis del potencial de licuefacción mostrado en la tabla XV debido que no presento continuidad en el resto de perforaciones. Adicional, en las perforaciones K y D se encuentran en un rango de 0.25-0.30, mientras que es un poco más leve en el entorno de la perforación E.

A los 10 metros de profundidad, en la figura 5.4., se destacan los sectores alrededor de las perforaciones: F, G, J y B, como se mencionó, la zona más crítica se denotó de color rojo, con FSliq entre 0.15-0.20, seguido de la zona anaranjado claro entre 0.20– 0.25 y finalmente la zona amarilla con valores entre 0.25-0.30. A los 15m aparecen las perforaciones D, E, F, A con un

FSliq entre 0.20-0.25 y las perforaciones L, K, C, en los rangos de 0.35-0.40 y 0.55-0.60 con colores en la gama de verde, lo que indica que es menos crítico, en la Figura 5.5. se puede apreciar lo descrito.

A pesar de que el análisis de las perforaciones potencialmente licuables, se decidió realizar hasta los 15 metros de profundidad, se decidió realizar un mapa a los 18 metros, para apreciar de manera visual, el comportamiento de las perforaciones. El mapa de potencial de licuefacción mostrado en la figura 5.6., muestra un área extensa con muy bajo factor de seguridad de licuefacción con valores entre 0.30-0.55, y otra zona color rojo con un FSliq entre 0.15-0.20, siendo este bastante puntual.

Finalmente, la figura 5.7. muestra un mapa representativo del potencial de licuefacción con todas las perforaciones analizadas, existe una zona de color rojo alrededor de la perforación I, que como se expresó anteriormente, no es de un espesor considerable. Sin embargo, las zonas marcadas de color naranja denotan áreas con FSliq crítico, existen otras zonas amarillo verdoso, las cuales son más leves, por otra parte, surgió el color marrón el cual es el resultado de la combinación de verde con rojo.

Adicional, la figura 5.8 muestra la representación visual de las zonas en las que se producirían asentamientos por licuefacción en el caso de un sismo con las características antes mencionadas, así como los rangos entre los

que estuvieron los asentamientos, como se observa, la zona más crítica es la circundante a la perforación E, ya que se encuentra entre 5.11 y 36.65cm.

CAPITULO 6

CRITERIOS GENERALES PARA PROPUESTAS DE SOLUCIONES

A continuación, se detallan varias posibles soluciones, para contrarrestar los efectos de una posible licuefacción de los suelos, en el caso de un sismo.

6.1 Columnas de Grava

La ejecución de Columnas de Grava o Vibro-sustitución constituye una técnica de mejora y refuerzo del terreno, basado en la vibración profunda y que se emplea tanto en obra civil como en edificación. Esta vibración profunda se basa en el desplazamiento lateral del terreno y en la incorporación y compactación de grava contra el terreno.

Es una técnica alternativa a cimentaciones profundas tradicionales, cuya ejecución no se basa en transmitir las tensiones hasta un sustrato competente, si no en sustituir el terreno existente por otro mejorado, mediante una mejora de todos los parámetros intrínsecos del terreno: ángulo de rozamiento, cohesión, módulo de deformación, densidad, etc., hasta obtener un suelo equivalente mejorado, de parámetros suficientes para el apoyo de esa estructura mediante una cimentación directa.

Este método ayuda a aumentar la capacidad de carga del terreno, mediante la densificación de las partículas, incrementa el módulo de rigidez del suelo de fundación, acelera la consolidación de suelos cohesivos, reduce la magnitud de

los asentamientos, así como el riesgo de licuefacción en arenas sueltas, ya que actúan similar a un dren.

Existen varios procedimientos constructivos, pero por lo general, se hinca la tubería, se llena la misma con material mejorado y mediante vibración este desciende y se extrae el accesorio, formando la columna.

La colocación de columnas de suelo mejorado, actúan como drenes y contribuyen a reducción de tiempos de consolidación y asentamientos.



Figura 6.1. Prueba de columnas de grava en la PTAR Las Esclusas.
Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

6.2 Reemplazo del material

En el caso de que las capas con potencial licuable no estén a grandes profundidades, dicho material puede ser reemplazado por uno con mejores características geológicas, para este método, es necesario considerar el tiempo que tardaría en realizarse esta actividad, el factor ambiental y el factor económico, ya que el movimiento de tierra y transporte del material, son rubros con precios elevados.



Figura 6.2. Reemplazo de material en la PTAR Las Esclusas.
Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

6.3 Drenajes para sismos

También conocidos como wick drains o mechas drenantes, poseen un núcleo sólido de polietileno, dotado de tiras resistentes (geo textiles de polipropileno),

que actúan como filtro en ambos costados y son usados para el drenaje vertical, mejora suelos blandos y reduce las trayectorias de drenaje en depósitos sueltos y blandos, consolidando el suelo.

Estos drenajes, ayudan a mitigar la licuefacción, a reducir los asentamientos por sismos, estabilizar taludes y acelera la consolidación de suelos cohesivos.

Estos se instalan mediante la inserción de una tubería de polietileno extruido altamente flexible, envuelta en un geo textil tipo filtro, altamente durable, con la ayuda de un martillo vibratorio, que permite su inserción en el suelo.

El geo textil posee propiedades filtrantes que ayudan a que el agua ingrese sin materiales finos, al dren, además, previenen la erosión. Los drenes se instalan con una separación de 1 a 2 metros.

Las ventajas principales de este método son la fácil instalación y movilización de equipos, se reduce el tiempo de construcción y se reducen los asentamientos. (Geosynthetic, 2016)



Figura 6.3. Colocación de Wick Drains.
Fuente: Geosynthetica, 2016

6.4 Compactación dinámica

También conocido como el método de compactación dinámica profunda (DDD siglas en inglés), requiere del uso de un martillo de percusión para la densificación del suelo y consiste en la compactación de la superficie por impacto, mediante transmisión de ondas de baja frecuencia producidas por el martillo, que viajan grandes distancias.

El procedimiento consiste en dejar caer un peso entre 10 y 35 toneladas, desde una altura de 10 a 30 metros en caída libre o cuasi libre, dependiendo de las

características del terreno y objetivo de la compactación, se detalla una malla de impactos y tiempos de espera, para una densificación homogénea.

Existe un efecto a corto y largo plazo, en el primero, se presenta una reducción de la relación de vacíos, debido al asentamiento producido en el suelo, mientras que, a largo plazo, el efecto es el aumento de la presión intersticial, lo que puede causar licuefacción local en el suelo, y mediante la liberación continua de las presiones intersticiales, el suelo se reestructura en un estado compacto, lo que aumenta la resistencia al corte del relleno.

A pesar de lo antes mencionado, el efecto de la compactación dinámica disminuye con la profundidad, ya que la energía de compactación es transmitida de maneras distintas.

La máxima profundidad del tratamiento son 10 m para 25 toneladas de peso, las ondas generadas son grandes y la homogeneización es de regular a buena.

Una desventaja de la compactación dinámica es que no puede aplicarse a ciudades y lugares donde existan tuberías, tanques y edificaciones a menos de 40 metros aproximadamente. Además, si existe un suelo cohesivo como limos y arcillas sobre la capa de suelo granular a compactar, dichos estratos absorberán la mayor parte de la energía, evitando que llegue al estrato requerido. (Menard México, 2013)

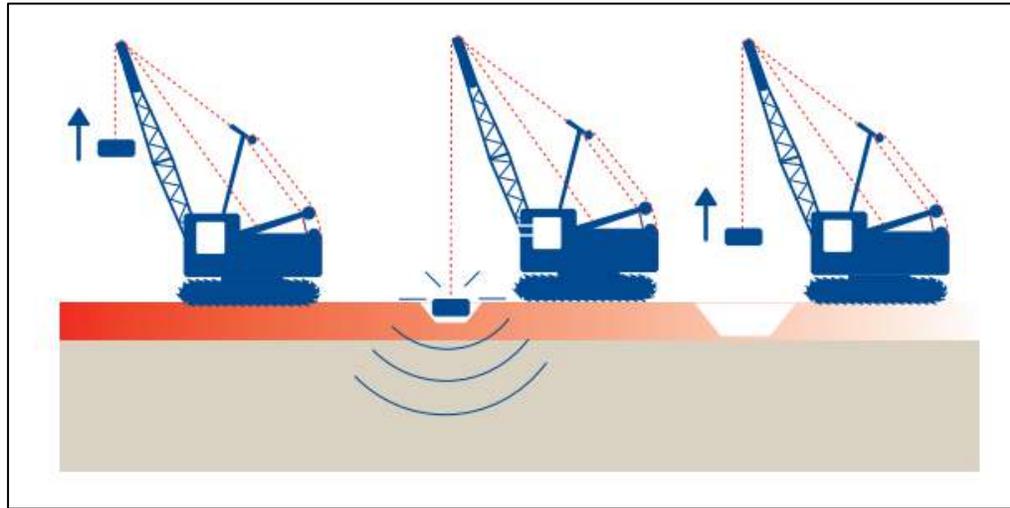


Figura 6.4. Compactación Dinámica.
Fuente: Menard México, 2013

6.5 Vibro-compactación

Una posible solución de mejoramiento masivo del subsuelo de la cimentación, es la vibro-compactación, que como su nombre indica, consiste en una compactación ocasionada por vibración en los diferentes estratos, mediante las técnicas de precarga y vibro-sustitución, es posible reducir los tiempos de espera, acelerar los asentamientos, mejorar la capacidad portante del suelo y así, reducir la consolidación secundaria (remanentes), esta última podría ser mitigada manteniendo un mayor tiempo de precarga.

Mientras el vibrador ingresa a la profundidad necesaria, se crean vibraciones a intervalos cada 0.5 a 1.0 metros, transfiriendo la energía hasta dicho estrato.

Una gran ventaja es que las ondas que se producen en el suelo mediante vibraciones constantes en el interior de la masa del suelo son de pequeña magnitud, lo que permite que pueda ser usado en las ciudades, o con estructuras cercanas al sitio.

La profundidad máxima es más de 70 metros, las ondas que genera son pequeñas y la homogenización es bastante buena.

Este método genera ondas de corte en cada estrato a la profundidad deseada mediante el vibrador, asegurando una compactación independiente. (Hayward Baker, 2009)

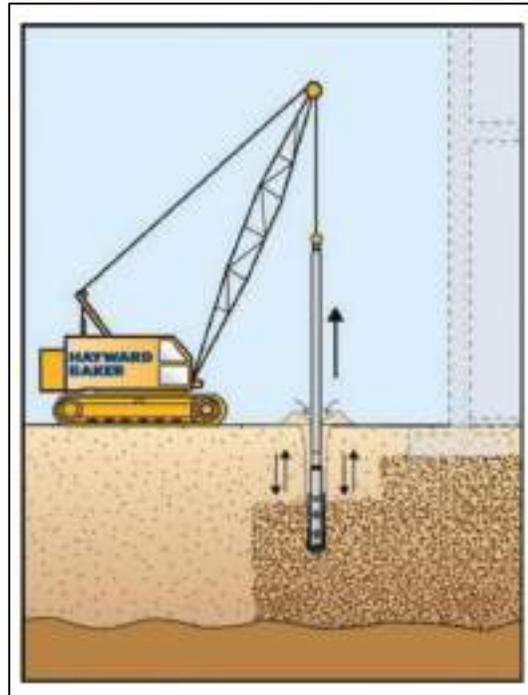


Figura 6.5. Vibro Compactación.
Fuente: Hayward Baker, 2009

6.6 Inyección de cemento

Este proceso se aplica al subsuelo con la finalidad de mejorar sus características geológica-geotécnicas, la cual consiste en llenar las fisuras y poros del terreno, reemplazándolo con un mortero o lechada líquido, el cual se solidifica con el pasar del tiempo. Esto se realiza con la finalidad de impermeabilizar y dar fuerza a rocas fisuradas o fundaciones defectuosas, existen varias formas de inyectar el suelo:

- Jet Grouting

- Por impregnación y fractura
- Por consolidación
- Lechada de cemento-bentonita con aditivos plastificantes y aceleradores de fraguado

Para la selección del método más preciso, se debe tener en cuenta las necesidades del proyecto, así como la estratigrafía del suelo y la permeabilidad de los estratos, el nivel freático, granulometría y porosidad del suelo. (Ovando, 2011)

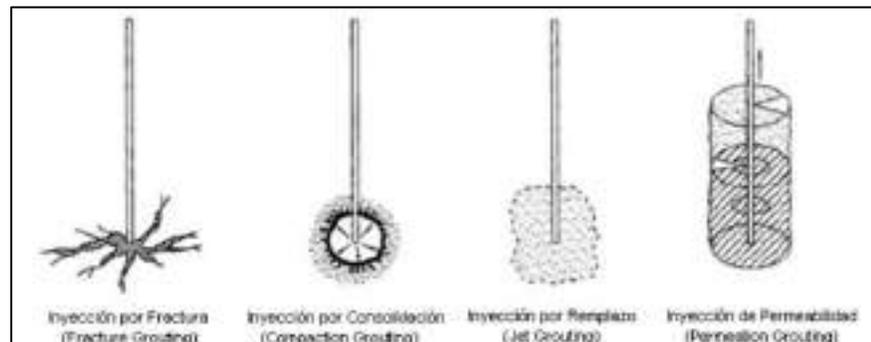


Figura 6.6. Inyección de Cemento.

Fuente: Raison, 2004

6.7 Cimentación Profunda

Para el uso de pilotes, es necesario realizar estudios previos, considerando las condiciones sub-superficiales, el tipo de estructura, y los requerimientos del proyecto. El estudio del subsuelo debe ser exhaustivo, para reconocer la presencia de formaciones rocosas, condiciones del nivel freático, y sobre todo

el potencial de licuefacción de los estratos. Se deben realizar sondeos en donde se ubicarán los pilotes, considerando una profundidad suficiente. Es importante considerar que la longitud que quede, una vez atravesado el estrato con potencial a licuarse, debe ser suficiente para soportar las cargas que serán aplicadas.



Figura 6.7. Hincado de Pilotes.
Fuente: Cordero, M., Torr , M. 2017

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se analizaron las características geológica-geotécnicas del subsuelo de la PTAR Las Esclusas, mediante ensayos de penetración estándar (SPT), cono de penetración estándar (CPT), ensayos geofísicos y granulometría, con los cuales se pudo determinar la presencia de alternancias de arcillas y capas de arena de potencia métrica. Esta composición corresponde a suelos aluviales, en un ambiente deltaico estuarino (el Río Guayas desemboca en el golfo).

A través de dichos ensayos, se crearon 3 diferentes grupos de perforaciones, los cuales permitieron construir los perfiles geotécnicos A-A' (Figura 3.1), B-B' (Figura 3.2) y C-C' (Figura 3.3), visualizando así, la distribución de los estratos en los diferentes cortes de secciones evaluadas.

Aquellos estratos con bajo grado de compactación, es decir, número de golpes menores a 20, con contenido de finos mayor o igual a 20%, índice de plasticidad baja y completamente saturados, sirvieron para segregar las muestras, de las cuales el 3.17% cumplió dichos parámetros y se catalogaron como susceptibles a licuarse (Seed H. &, 1971).

Se obtuvo el CRS y CRR, mediante las ecuaciones empíricas de (Boulanger & Idriss, 2014), con lo que se determinó el factor de seguridad por licuefacción. El 1.59% de todas las muestras analizadas, presentaron un FSliq menor a 1, lo que

indicó que el esfuerzo cíclico fue mayor que la resistencia cíclica tangencial del suelo, siendo estos potencialmente licuables, ante la presencia de un posible sismo.

Acorde a la curva establecida por (Boulanger & Idriss, 2014), con CSR para un sismo con magnitud 7.5 y presión atmosférica de 1 atmósfera, se determinó que las muestras sobre la curva (Figura 4.6), presentaron características de suelos potencialmente licuables. De las 38 muestras susceptibles a licuefacción, 26 cumplieron lo establecido en la gráfica. Sin embargo, de las 26 muestras solo 9 podrían representar un peligro para la estructura, lo que equivale al 34.62% y el 1.43% de las muestras totales.

La zona del clarificador, en la que se ubican las perforaciones E y G, presentan diferencias en su estratigrafía. En el caso de la perforación E, se deduce un alto potencial de licuefacción, a diferencia del sondeo G, esto implica que existen dudas en el resto del área analizada.

Para el cálculo de los asentamientos post-licuefacción se consideró un medio isotrópico, es decir, no depende de la dirección en la que se evalúe el medio, se realizó por cargas dinámicas considerando los métodos de (Boulanger & Idriss, 2014) y (M. Yoshimine, 2006) en las perforaciones B, C, E y G, las cuales están

conformadas por los estratos con potencial a licuarse, dichos asentamientos fueron 2.09 cm, 3.81cm, 36.65 cm y 1.59 cm, respectivamente. El asentamiento más crítico se presentó en la perforación E, la cual posee un LPI bastante alto, por lo que el área circundante de esta perforación debe ser cuidadosamente analizada.

Los mapas de zonificación, mostraron el factor de seguridad de licuefacción a 1m, 3m, 5m, 10m, 15m, y 18m, así como un mapa con la combinación de todos los factores, en los que se pudo observar las zonas más críticas o menos seguras, en el caso de un sismo de magnitud 7.5 y 1 atm de presión atmosférica. Se observó que a los 15 y 18 metros existen zonas críticas amplias, lo cual debe considerarse al momento de elegir una solución. Además, se realizó un mapa de zonificación post-licuefacción, en el que se pudo observar, en el caso de un sismo con las características antes mencionadas, en qué sectores se producirían los asentamientos calculados y presentados en la tabla XIV, una vez más, se observa que la zona más crítica, es alrededor de la perforación E.

Se propusieron algunas posibles soluciones que podrían contrarrestar los efectos de la licuefacción, mas no se seleccionó una específica, debido a que el alcance

del presente proyecto fue de analizar el potencial de licuefacción, lo cual no incurrió en determinar una solución específica para cada zona de estudio, puesto que eso requiere análisis posteriores más profundos, considerando diversos factores.

RECOMENDACIONES

Para evitar el sobre-dimensionamiento de la cimentación en cualquier tipo de estructura, es recomendable analizar el suelo y el potencial de licuefacción del mismo, de esa forma se podría generar un ahorro significativo en el tiempo de ejecución y economía de la obra.

Se recomienda utilizar programas como ArcGis y ArcScene, para comprender de manera visual el comportamiento de los estratos por la licuefacción y sus respectivos asentamientos, para así lograr reconocer las zonas más críticas del proyecto.

En la zona donde se encuentra la perforación E, está proyectada la construcción de un Clarificador, por lo que se recomienda realizar al menos dos perforaciones adicionales, con la finalidad de reconocer si los estratos de arena son continuos, o forman lentes. A partir de esta información, se podría plantear una solución, como por ejemplo el uso combinado de pilotes y columnas de grava.

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

- ASTM International. (2007). ASTM D422-66- Análisis Granulométrico.
- ASTM International. (2010). ASTM D4318 - 10. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2010). ASTM 2287 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
- ASTM International. (2010). ASTM D1140 Standard Test Methods for Determining the Amount of Material Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Soils by Washing.
- ASTM International. (2010). ASTM D2166 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.
- ASTM International. (2010). ASTM D2216 Determinación del Contenido de Humedad.
- ASTM International. (2011). ASTM D1586. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.
- ASTM International. (2016). ASTM D3441 - 16. Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, PA.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2014). *CPT and SPT based Liquefaction Triggering Procedures*. University of California, Department of Civil and Environmental Engineering , Davis, CA. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017

Brady, B. H. (1999). *Rock Mechanics*. Kluwer Academic.

Bray, S. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of finegrained. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* .

Cetin, K. O., Bilge, H. T., Wu, J., Kammerer, A. M., & Seed, a. R. (Marzo de 2009). Probabilistic Models for Cyclic Straining of Saturated. *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*.

Geosynthetica. (31 de Marzo de 2016). *geosynthetica.net*. Obtenido de Drainage and Filtration Engineering: <https://www.geosynthetica.net/drainage-filtration-engineering-geoamericas/>

Hayward Baker. (2009). *Hayward Baker - A Keller Company*. Obtenido de Vibro Compaction:
<http://reports.mckinneydrilling.com/WhatWeDo/Techniques/GroundImprovement/VibroCompaction/default.aspx>

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., & Yasuda, S. (1978). A practical method for Assessing Soil Liquefaction Potential based on case studies at various sites in Japan. *2nd International Conference on Microzonation*, (págs. 885-896). San Francisco.

Jae-Won, C., & David, R. (2011). Simplified Method for Spatial Evaluation . ASCE.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson.

- Lavenu, A. (Diciembre de 2006). Neotectónica de los Andes. *Neotectónica de los Andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia y Chile): una revisión*. Argentina.
- M. Yoshimine, H. N. (2006). *Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application of flow slide of infinite slope*. 26 (2-4), 253-264.
- Menard México. (10 de Enero de 2013). *Menard México - Ground Improvement Specialists*. Obtenido de Compactación dinámica: http://menard.com.mx/sites/menard.com.mx/files/fichas%20tecnicas/compactaciondinamica_f_tecnica_10_enero_2013_baja.pdf
- NEC. (2014). *Geotecnia y Cimentaciones*. Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- NEC. (Diciembre de 2014). *Geotécnia y Cimentaciones*. Dirección de comunicación social.
- NEC. (2015). *NEC-SE-DS. CARGAS SISMICAS Y DISEÑO SISMO RESISTENTE*.
- Ovando, H. (2011). *Inyección de suelo por medio de la técnica de Jet Grouting*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Peter, R., & Richard, C. (1985). Liquefaction Potential of Sands Using The CPT. *ASCE*.

- R, L., & Frost, J. (1998). Spatial Liquefaction Analysis System. *J.Comput. Civ. Eng*, 48-56.
- Raison, C. A. (2004). *Ground and soil improvement* . Gran Bretaña: ISBN 0 7277 3170 X.
- Robertson, D. P. (1990). *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal.
- Seed, H. &. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*.
- Seed, R. B. (2010). *Technical Review and Comments 2008 EERI Monograph "Soil Liquefaction during Earthquakes"*. University of California at Berkeley, Berkeley.
- Subterra Ingenieria Getécnica. (2014). *Ensayo CPT*. Guayaquil.
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1980). *Mecanica de Suelos en La Ingenieria Practica*.
- Vallejo, L. G. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall. Recuperado el Noviembre de 2017
- Vallejo, L. G., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingenieria Geológica*. Madrid: Pearson.