



Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: EIC-Lanamme-INF-1240-2023

Análisis de licuación del tramo de la Ruta Nacional 23 entre puerto Caldera y el puente sobre el río Barranca

INFORME FINAL



Fuente: Semanario Universidad, 2023

Preparado por:

Ing. Laura Solano Matamoros
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica
Setiembre, 2023



1. Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Análisis de licuación del tramo de la Ruta Nacional 23 entre puerto Caldera y el puente sobre el río Barranca		4. Fecha del Informe 06 de setiembre de 2023
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen <i>Dado el acontecimiento ocurrido el pasado 06 de junio del año en curso sobre la Ruta Nacional 23, tras el paso de la tormenta tropical #6, que provocó un incremento significativo en los oleajes del Pacífico en el territorio nacional, registrando olas de hasta 3 metros de altura, el LanammeUCR se da a la tarea de realizar varios análisis geológico – geotécnicos en el sitio afectado. Se debe contemplar que la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) ha documentado un aumento de uno o dos grados centígrados en la temperatura del mar costarricense, lo que implica un incremento en el nivel del mar de al menos 15 a 20 centímetros, lo cual propicia que, con un leve aumento en el oleaje, se sobrepase el nivel del rompeolas colocado en Caldera, llegando a la calzada y contribuyendo a la saturación del entorno.</i> <i>Entre los análisis realizados, el presente informe expone los resultados del análisis de licuación realizado en cuatro ubicaciones a lo largo del tramo de la Ruta Nacional 23, que abarca desde el desvío al puerto Caldera hasta el puente sobre el río Barranca. En la zona del puente sobre el río Barranca, se identificaron factores de seguridad que indican la susceptibilidad a la ocurrencia del fenómeno de licuación en estratos localizados a partir de los 8 metros de profundidad. En términos generales, se subraya la importancia de realizar un análisis con una mayor exploración geotécnica para que el profesional geotecnista tome decisiones respecto a la implementación de soluciones, dado el continuo aumento de los oleajes en la zona. El incremento del nivel del mar provoca la saturación de estratos ubicados en capas más superficiales, lo que, de acuerdo con los resultados de este análisis, podría hacer que sean susceptibles al fenómeno de licuación, ocasionando desplazamientos laterales y asentamientos que podrían afectar el tramo de la carretera de la Ruta Nacional 23 y las estructuras cercanas.</i>		
8. Palabras clave Ensayo de perforación estándar (SPT), análisis de licuación, resistencia al esfuerzo cíclico, desplazamiento lateral residual.	9. Nivel de seguridad: -	10. Núm. de páginas 32
11. Preparado por: Ing. Laura Solano Matamoros. Programa Ingeniería Geotécnica		
12. Revisado por: Lic. Nidia Segura Unidad de Asesoría Legal Lic. Giovanni Sancho Coordinador Unidad de Asesoría Legal		
13. Revisado y aprobado por: Ana Lorena Monge Sandí, MSc. Coordinadora Programa Ingeniería Geotécnica		



Contenido

I.	Introducción	6
II.	Antecedentes.....	7
III.	Metodología.....	8
III.1	Ensayo de penetración estándar (SPT)	8
III.2	Ensayos de laboratorio.....	11
III.3	Análisis para la determinación del factor de seguridad asociado a la resistencia a la licuación del suelo	11
IV.	Resultados obtenidos	14
IV.1	Estratigrafía y tipos de materiales encontrados	14
IV.2	Ensayos de caracterización del material.....	16
IV.2.1	ASTM D2216 Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas	16
IV.2.2	ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo	17
IV.2.3	ASTM D1140 Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75 µm (Nº 200) en suelos mediante lavado	17
IV.2.4	ASTM D6913 Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices).....	18
IV.2.5	ASTM C29 Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel (“peso unitario”) y los huecos de aire de un agregado	20
V.	Análisis del potencial de licuación.....	20
V.1	Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 1	21
V.2	Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 2	24
V.3	Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 3	26
V.4	Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 4	26
VI.	Análisis de licuación con ajuste por magnitud del sismo	29
VII.	Comentarios finales.....	31
VIII.	Referencias	32



Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio	7
Figura 2. Esquema del equipo del ensayo SPT	9
Figura 3. Ubicación espacial de las perforaciones SPT realizadas en la zona de estudio	10
Figura 4. Curvas de licuación: Correlación entre los valores de $(N1)_{60}$ y CRR ($M=7.5$)	13
Figura 5. Clasificación de los materiales con la carta de plasticidad de Casagrande	17
Figura 6. Curvas granulométricas, Muestra M-1365-2023	18
Figura 7. Curva granulométrica, Muestra M-1385-2023	19
Figura 8. Curva granulométrica, Muestra M-1367-2023	19
Figura 9. Tipos de suelo de la hoja San José	21
Figura 10. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 1 ...	22
Figura 11. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 1	23
Figura 12. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 2 ...	24
Figura 13. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 2	25
Figura 14. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 4 ...	27
Figura 15. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 4	28



Tablas

Tabla 1. Ensayos de laboratorio realizados	11
Tabla 2. Factor de escala de la magnitud del sismo	13
Tabla 3. Resumen de valores N_{spt} obtenidos en las perforaciones	14
Tabla 4. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 1 (M-1365-2023).....	15
Tabla 5. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 2 (M-1385-2023).....	15
Tabla 6. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 3 (M-1366-2023).....	16
Tabla 7. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 4 (M-1364-2023).....	16
Tabla 8. Contenido de humedad para las muestras indicadas	16
Tabla 9. Resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	17
Tabla 10. Porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200).....	18
Tabla 11. Diámetro de partícula en el que se retiene el 50% del material (D50).....	20
Tabla 12. Densidad para las muestras indicadas.....	20
Tabla 13. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 1	22
Tabla 14. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 2	24
Tabla 15. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 3	26
Tabla 16. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 4	27
Tabla 17. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 1	29
Tabla 18. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 2	30
Tabla 19. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 3	30



Análisis de licuación del tramo de la Ruta Nacional 23 entre puerto Caldera y el puente sobre el río Barranca

I. Introducción

En el presente informe se muestran los resultados del análisis de licuación realizado en 4 sitios ubicados a lo largo del tramo de la Ruta Nacional 23, que comprende desde el desvío al puerto Caldera hasta el puente sobre el río Barranca.

A causa del acontecimiento ocurrido el pasado 06 de junio del presente año en el que un fenómeno de fuerte oleaje, ocasionado por el paso de la onda tropical #6, se generaron importantes afectaciones en la carretera que comunica caldera con Puntarenas. Dada la ubicación costera de la zona afectada y la predominancia en su conformación de suelos arenosos se realiza el análisis para determinar el factor de seguridad del suelo ante el fenómeno de licuación.

El fenómeno de licuación ocurre en suelos saturados durante la acción de una carga cíclica intensa, que ocasiona un incremento en la presión de agua debido a la vibración, lo que provoca es que las partículas del suelo pierdan parte de su contacto y, en esencia, el suelo se comporta momentáneamente como un fluido, perdiendo su capacidad de soportar cualquier carga. En consecuencia, se presenta el colapso del terreno y las estructuras que se encuentran sobre este.

Existen distintas metodologías para evaluar el potencial de licuación siendo la más utilizada la que establece una comparación entre la carga cíclica inducida (CSR) con la resistencia a la carga cíclica del suelo (CRR).

En este documento se presentan entre otras cosas, la información de campo y laboratorio que permitió obtener el perfil de suelos existente en el sitio, así como las características de los materiales y sus propiedades físicas necesarias para el análisis de licuación. Con base en toda esta información disponible y los resultados obtenidos se manifiestan los comentarios y recomendaciones respectivas. Es importante hacer notar que la información de la exploración geotécnica es limitada, por lo que los resultados de este análisis se deberían tomar como base e insumo para análisis más profundos que se realicen al respecto.

En la Figura 1 se presenta la zona de interés para el análisis de licuación. Debido a su cercanía al nivel del agua y a la conformación de los suelos de la zona, donde predominan los materiales arenosos, se distribuyeron de manera estratégica cuatro perforaciones en la zona vulnerable a la afectación del incremento de los oleajes. La ubicación exacta de dichas perforaciones se indicará en apartados posteriores.

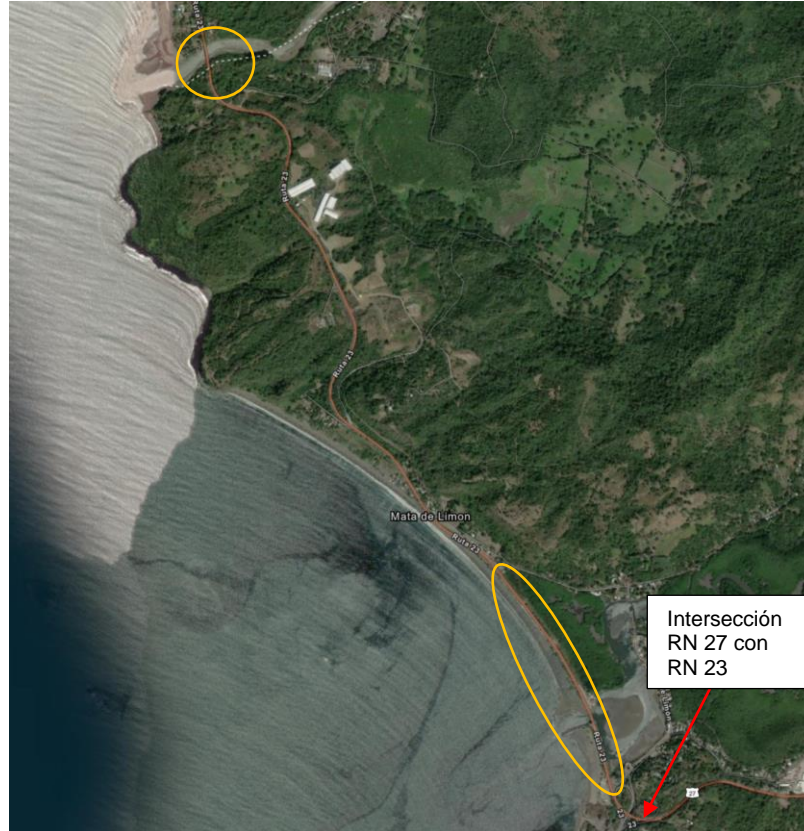


Figura 1. Ubicación del área de estudio

II. Antecedentes

La zona de interés se ubica en la provincia de Puntarenas, en el cantón con el mismo nombre y el distrito de Barranca. Para llegar al sitio se sugiere seguir la Ruta Nacional 27 hasta llegar al cruce con el puerto de Caldera. Desde este punto se toma en dirección noroeste sobre la Ruta Nacional 23 el trayecto que se ubica paralelo al mar y hasta llegar al puente sobre el río Barranca.

El 25 de marzo de 1990 tuvo lugar el terremoto de Cóbano Puntarenas, el movimiento registró una magnitud de 7.0 en la escala de Richter, no se generaron muertes o daños importantes de infraestructura, sin embargo, hubo evidencia de la ocurrencia en ciertos puntos costeros del fenómeno de licuación, así como grietas de considerable longitud, principalmente en la zona del muelle y también en el rompeolas.

En el informe de auditoría técnica del LanammeUCR (LM-AT-24-2007) "Rehabilitación de la carretera costanera sur, Ruta Nacional N°23", se indica en los hallazgos que, a pesar de incluirse en la obra importantes elementos para el funcionamiento satisfactorio de la carretera, se manifiesta que faltaron obras importantes con relación a la canalización adecuada de aguas. Esta condición puede favorecer a la saturación del medio, haciéndolo propenso al fenómeno de licuación.

Posteriormente, el pasado 06 de junio del presente año tras el paso de la tormenta tropical #6, ocurrió el incremento de los oleajes en el pacífico del territorio nacional, registrando olas de hasta 3 metros de altura. Aunado a esto y según la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), se ha registrado un aumento de temperatura del



mar costarricense de uno o dos grados centígrados, lo que significa un aumento en el nivel del mar de por lo menos 15 a 20 centímetros. Esto propicia que con un leve incremento del oleaje se supere el nivel del rompeolas, alcanzando la calzada y contribuyendo a la saturación del medio.

III. Metodología

Teniendo en consideración la situación actual del sitio, donde existe el registro de un evento de fuertes oleajes en el tramo del sector costero de la Ruta Nacional 23 que propicia la saturación del suelo convirtiéndolo en un medio propenso al fenómeno de licuación, se realiza el análisis de licuación, con la metodología de Seed et al. (1984), en algunos puntos seleccionados que bajo criterio geotécnico dadas sus condiciones actuales pueden ser potencialmente licuables.

La investigación geotécnica realizada consistió primeramente en trabajo de campo, para esto se realiza una visita de inspección al sitio por parte de los ingenieros del LanammeUCR, para evaluar las condiciones actuales y establecer las zonas críticas y propensas a condiciones que puedan repercutir en la pérdida de capacidad para resistir cargas por el fenómeno de licuación. En una segunda visita de campo se define, en compañía de personal del Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR, la ubicación final de las perforaciones SPT, cuya descripción general se encuentra en el próximo apartado.

Las muestras de suelo extraídas de las perforaciones son trasladadas al laboratorio donde se realiza la descripción de los materiales y se complementa con los ensayos de laboratorio necesarios para clasificar el material. Los ensayos realizados se describen en el apartado de trabajos de laboratorio.

Posteriormente se realiza el análisis de escritorio, donde se integra la información obtenida y con base en esto, el criterio de profesionales con conocimiento en geotecnia y uso de softwares especializados, se realiza el análisis para determinar la resistencia al fenómeno de licuación de los sitios en cuestión. Finalmente se brindan los comentarios y recomendaciones finales a considerar para el adecuado funcionamiento de la ruta en cuanto a temas geotécnicos.

III.1 Ensayo de penetración estándar (SPT)

El ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), es el método de ensayo in situ más utilizado para muestrear y caracterizar el material de un sitio en estudio, y que mediante cálculos indirectos permite obtener la capacidad de soporte del medio.

El ensayo consiste en establecer el número de golpes que se requieren para que un barril con un muestreador partido se introduzca en el terreno a una profundidad determinada, dejando caer un martillo con una masa estándar. En Costa Rica, se utiliza el procedimiento del método de ensayo especificado por la ASTM D1586, donde se establece que la masa del martillo es de 63.5 kg, la altura de caída es de 760 mm, el diámetro del muestreador es de 50 mm y la profundidad para determinar el número de golpes por cada capa es de 45 cm. El esquema de la Figura 2 muestra el equipo utilizado en este ensayo.

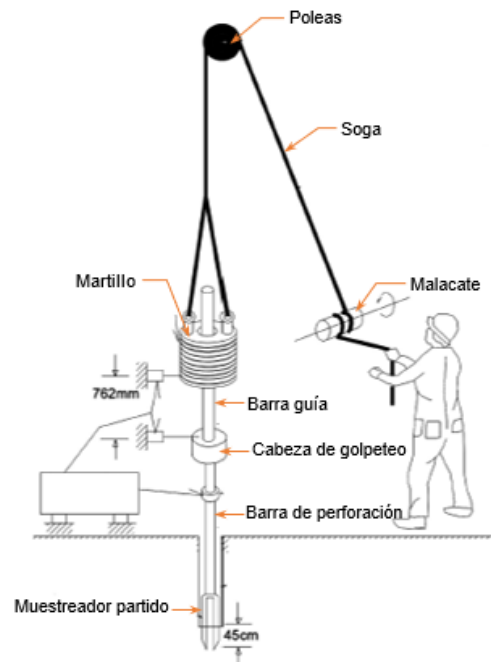


Figura 2. Esquema del equipo del ensayo SPT
Fuente: Schaind (2009)

Estos ensayos son aplicables a suelos que son relativamente blandos y no se puede realizar cuando se encuentran suelos firmes o basamentos rocosos, puesto que en estos materiales se generan un rebote, con lo cual ya no se reporta un número de golpes para penetrar el material. En estas condiciones, es posible indicar que el ensayo terminó. La norma ASTM D1586, establece que el rebote se alcanza cuando se presenta alguna de las siguientes situaciones:

- Un total de 50 golpes durante cualquiera de los tres incrementos de 15 cm que componen los tramos de 45 cm de la profundidad de avance
- Si se aplicaron 100 golpes en total
- No se observa avance del muestreador durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martillo
- El muestreador avanza los 45 cm de la profundidad de avance sin que ocurran los conteos de golpes limitantes como los descritos anteriormente
- Si el muestreador se hunde bajo el peso del martillo, el peso de barras de perforación o ambos, se registra la longitud del recorrido. Si el muestreador se hunde durante todo el intervalo, se detiene el ensayo, se retiran el muestreador y las barras de perforación y se avanza a través de los materiales muy blandos o sueltos hasta la siguiente profundidad de muestreo. Se registra el valor N como peso del martillo, peso de las barras o ambos

Para este trabajo en específico, se realizan 4 ensayos de SPT, cuya ubicación se muestra en la Figura 3. La perforación 1 se realizó hasta una profundidad de 9,5 m, la perforación 2 alcanzó una profundidad de 5,50 m, la perforación 3 alcanzó una profundidad de 2,00 m, y la perforación 4 alcanzó los 9,50 m. En cada una de las perforaciones se aplicó el criterio de la norma ASTM D1586 para finalizar el ensayo, siendo este un máximo de 50 golpes en cualquiera de los 3 incrementos, es decir se llega al rebote del equipo en todas las perforaciones.

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 9 de 32
-----------------------------------	-----------------	----------------

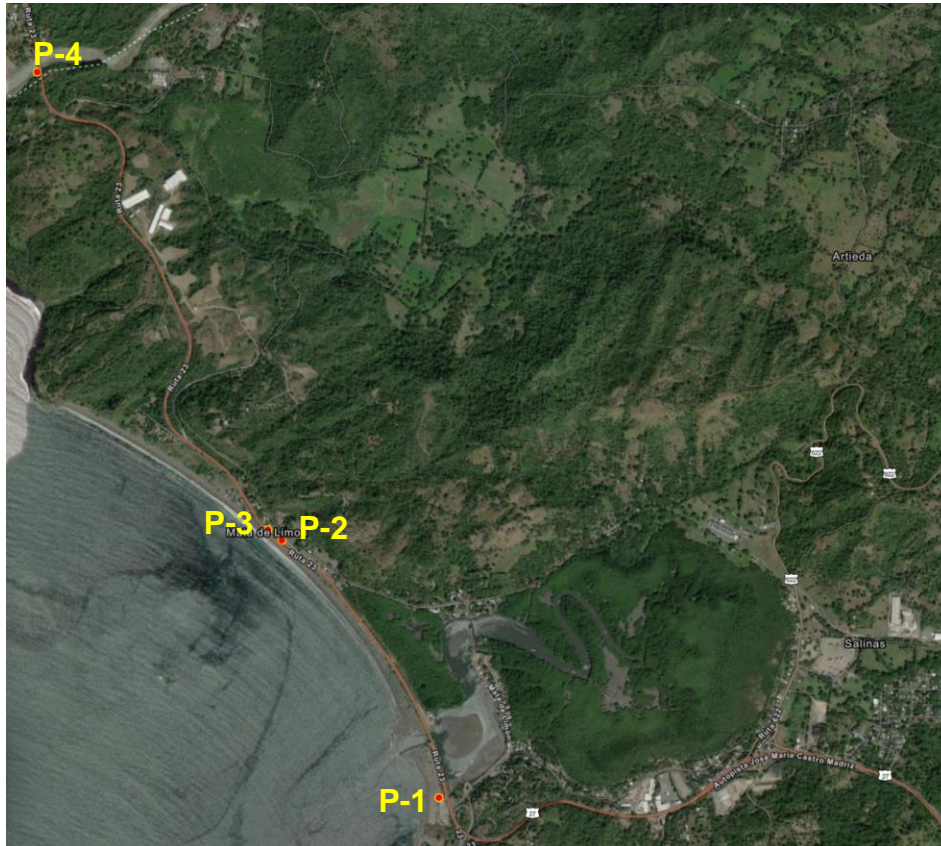


Figura 3. Ubicación espacial de las perforaciones SPT realizadas en la zona de estudio

La ubicación y descripción de los cuatro puntos de perforación anteriores, se detalla a continuación:

- **Perforación 1 (P1):** Sitio cercano a la playa y a Puerto Caldera, sin problemas de acceso (zona según CCCR con materiales susceptibles a licuación). Coordenadas: (9.91863342000004, -84.7127899799999)
- **Perforación 2 (P2):** Sitio ubicado dentro de los 400 m críticos de la Ruta Nacional 23. Perforación en el patio de la Escuela Caldera. Coordenadas: (9.93384668000004, -84.7226272399999).
- **Perforación 3 (P3):** Sitio ubicado frente a la calle de acceso a la Escuela Caldera, contiguo al poste del lado del enrocado, en vía pública. Coordenadas: (9.933224, -84.722259).
- **Perforación 4 (P4):** Perforación en margen izquierdo del río Barranca, donde la calle de acceso se encuentra justo al final del puente en sentido Puntarenas-San José. También se debe tomar en consideración que las mareas suben cada seis horas. Coordenadas: (9.95983307000005, -84.7359387899999)



III.2 Ensayos de laboratorio

A partir de las muestras obtenidas mediante la aplicación del ensayo de penetración estándar se aplican una serie de pruebas de laboratorio a estos especímenes. En la Tabla 1, que se muestra a continuación, se enlistan los procedimientos que se aplicaron a las muestras extraídas del sitio, así como la cantidad correspondiente de ensayos que se realizaron en total de cada uno de estos procedimientos.

Tabla 1. Ensayos de laboratorio realizados

Procedimiento	Descripción	Cantidad
ASTM D2216*	Contenido de humedad suelos y rocas	49
ASTM D6913	Distribución de tamaño de partículas de los suelos (Análisis granulométrico)	7
ASTM D1586	Ensayo de penetración estándar y muestreo de suelos (SPT)	4
ASTM D1140*	Lavado en el tamiz No. 200	9
ASTM D4318*	Límites de Atterberg	7
ASTM C29	Método de ensayo para determinar densidad masiva (peso unitario) y los vacíos en agregado fino	9

*Método acreditado

Con los resultados de estos ensayos, fue posible clasificar el material y asignarle propiedades necesarias para el análisis inicial de licuación.

Es importante tener en consideración que la caracterización realizada para este sitio de estudio es general y preliminar, donde las muestras fueron tomadas en puntos específicos y los resultados se extrapolan a la generalidad del sitio para el análisis efectuado. Por lo tanto, los resultados mostrados en el presente informe no son definitivos y tampoco tienen la intención de sustituir un análisis posterior mayor y exhaustivo, contando con resultados de una campaña de exploración geotécnica de mayor extensión, para así poder contar con los insumos necesarios y suficientes para determinar con mayor precisión la condición de resistencia a licuación del sitio. Por lo que este análisis se constituye como insumo y una guía que puede ser tomada en consideración y de referencia para llevar a cabo análisis más detallados.

III.3 Análisis para la determinación del factor de seguridad asociado a la resistencia a la licuación del suelo

Actualmente el uso de ensayos in situ es el método más confiable para la evaluación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de licuación, el cual se puede evaluar al comparar la carga sísmica (CSR) con la resistencia a la licuación (CRR), expresada como un factor de seguridad dado por la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{CRR_{7,5}MSF}{CSR} K_{\alpha} K_{\sigma} \quad (1)$$

Donde:

CRR_{7,5}= Razón de resistencia cíclica para un sismo de magnitud 7,5

CSR= Razón de esfuerzo cíclico

MSF= Factor de escala de la magnitud del sismo

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 11 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------



K_α = Factor de corrección por sobrecarga
 K_σ = Factor de corrección por pendiente del terreno

El CSR, tal como fue propuesto por Seed e Idriss en 1971, se define como el esfuerzo cortante cíclico promedio desarrollado en la superficie horizontal de capas de suelo debido a ondas de corte que se propagan verticalmente. Este valor se normaliza dividiendo entre el esfuerzo efectivo vertical inicial, σ_v , con el fin de incorporar el aumento en la resistencia al corte debido al incremento en el esfuerzo efectivo. Al ponderar adecuadamente los ciclos individuales de esfuerzo con base en datos de ensayos de laboratorio, se ha determinado que una amplitud razonable para el esfuerzo uniforme equivalente es aproximadamente el 65% del esfuerzo cortante máximo. El CSR se determina con la siguiente ecuación:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \quad (2)$$

Donde:

a_{max} = Aceleración horizontal máxima del terreno
 g = Aceleración de la gravedad
 σ_v = Esfuerzo por sobre carga a una profundidad z
 σ'_v = Esfuerzo efectivo por sobre carga a una profundidad z
 r_d = Factor de reducción por esfuerzo

El factor de reducción de esfuerzo, " r_d ", se utiliza para determinar el esfuerzo cortante máximo en diferentes profundidades del suelo. Los valores generalmente varían desde 1 en la superficie del suelo hasta valores más bajos en profundidades mayores.

De acuerdo con Idriss(1999) el " r_d " se determina con las siguientes ecuaciones:

$$\ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z)M_w \quad (3)$$

$$\alpha(z) = -1,012 - 1,126 \sin \left(\frac{z}{11,73} + 5,133 \right) \quad (4)$$

$$\beta(z) = 0,106 + 0,118 \sin \left(\frac{z}{11,28} + 5,142 \right) \quad (5)$$

Donde:

Z = profundidad en metros ≤ 34 m
 M_w = magnitud del sismo

La razón de resistencia cíclica "CRR" es el otro término necesario para calcular el factor de seguridad contra la licuación. El CRR representa el CSR máximo al cual un determinado suelo puede resistir la licuación.

La ecuación para el CRR, corregido por magnitud, es la siguiente:

$$CRR = CRR_{7,5} MSF \quad (6)$$

De acuerdo con Seed et al. (1984) se debe utilizar la gráfica que se muestra en la Figura 4 para determinar el valor de $CRR_{7,5}$.

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 12 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------

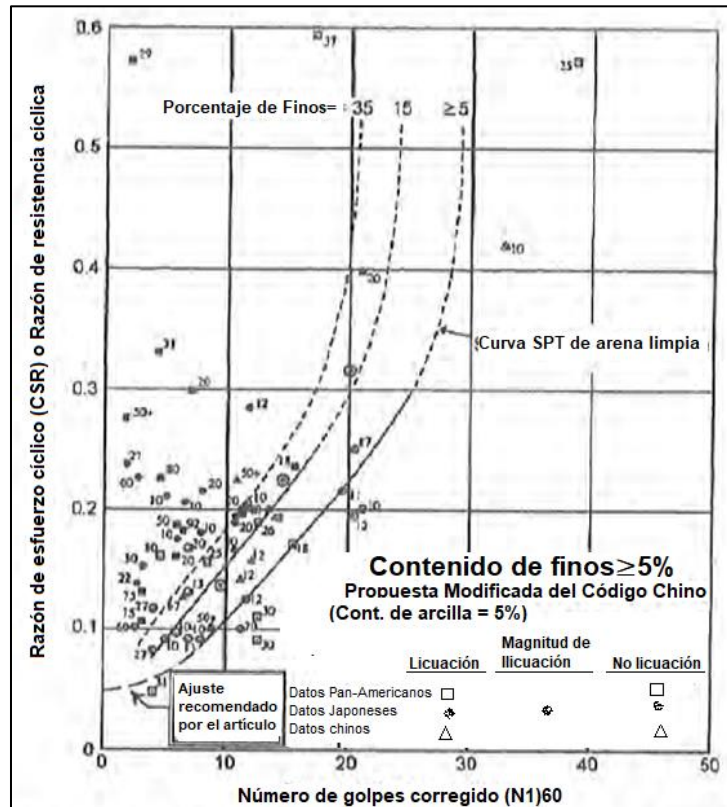


Figura 4. Curvas de licuación: Correlación entre los valores de (N1)60 y CRR (M=7.5)
Fuente: Seed et al. (1984)

Dada la limitada cantidad de información disponible cuando se desarrolló esta metodología, las ecuaciones fueron planteadas para un sismo de magnitud 7,5, sin embargo, si la magnitud del terremoto no es 7,5, entonces los valores de CRR deben corregirse según la magnitud del terremoto con el factor MSF, el cual de acuerdo con Idriss (1999) se determina con la ecuación (7).

$$MSF = 6,9^{\left(\frac{-M}{4}\right)} - 0,058 \leq 1,8 \quad (7)$$

O bien es posible aplicar directamente el factor correspondiente a la magnitud del sismo según la Tabla 2.

Tabla 2. Factor de escala de la magnitud del sismo

Magnitud MF	Seed & Idriss (1982)	Idriss
5,5	1,43	2,20
6,0	1,32	1,76
6,5	1,19	1,44
7,0	1,08	1,19
7,5	1,00	1,00
8,0	0,94	0,84
8,5	0,89	0,72



IV. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de los ensayos de campo, así como los realizados en laboratorio tanto de caracterización como de resistencia, se muestran en los siguientes apartados.

IV.1 Estratigrafía y tipos de materiales encontrados

Como se mencionó en apartados anteriores, se realizaron 4 perforaciones hasta alcanzar el criterio de norma para finalizar el ensayo. Las perforaciones se ubican en diferentes puntos a lo largo del trayecto de interés para el análisis. En la Tabla 3, se presenta en forma esquemática el perfil de suelos detectado en la zona, el cual permite ilustrar la consistencia de los suelos, la disposición de las capas y el espesor de estas. Las capas se definieron según la descripción de las muestras y no por el número de golpes SPT, priorizando la caracterización del material para el posterior análisis de susceptibilidad al fenómeno de licuación.

Tabla 3. Resumen de valores N_{spt} obtenidos en las perforaciones

Profundidad (cm)		Valores del N _{SPT}			
		P1	P2	P3	P4
Desde	Hasta				
0	50	3	5	85	6
50	100	20	1	56	8
100	150	16	0	36	5
150	200	12	9	81	3
200	250	17	18	0	7
250	300	15	26	0	17
300	350	30	32	0	13
350	400	34	47	0	6
400	450	30	41	0	12
450	500	20	84	0	17
500	550	20	113	0	21
550	600	19	0	0	28
600	650	23	0	0	38
650	700	31	0	0	22
700	750	24	0	0	17
750	800	37	0	0	15
800	850	60	0	0	23
850	900	27	0	0	16
900	950	89	0	0	15

	Estrato superficial
	Capa 1
	Capa 2
	Capa 3
	Capa 4

A continuación, en la Tabla 4, Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7, se realiza la descripción de las respectivas capas, su profundidad y consistencia según el número de golpes N_{spt} asociado:



Tabla 4. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 1 (M-1365-2023)

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N _{spt} (promedio)
0-100	Material arenoso color gris claro, con partículas de variados tamaños, mal graduado y contaminado con materia vegetal (raíces y trozos de madera seca)	12
100-300	Material arenoso color gris claro, con finas partículas coralinas blancas y arena negruzca, prevalecen granos medianos y finos con aisladas partículas de roca redondeada semicompactas de hasta 95 mm de diámetro presenta pocos finos cohesivos (bastante limpio)	15
300-700	Estrato areno-gravoso color gris claro, tamaños y formas variables con finos medios y gruesos y formas cúbicas y redondeadas muy compactas de hasta 25 mm de diámetro, con regular cantidad de finos poco o nada cohesivos	26
700-950	Material combinado de arena fina, poco o nada cohesiva, color gris claro, con regular cantidad de rocas cúbicas y redondeadas negras y blancuzcas compactas de hasta 19 mm de diámetro	48

*Nota: Entre las profundidades 405 cm – 450 cm y 450 cm – 495 cm, se detectó la presencia de nivel freático.

Tabla 5. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 2 (M-1385-2023)

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N _{spt} (promedio)
0-150	Material arenoso color gris claro, con partículas de variados tamaños, mal graduado y contaminado con materia vegetal (raíces y trozos de madera seca)	7
150-200	No se recuperó muestra	
200-250	Material arenoso-limoso color café claro, muy fino, con algunos bloquecillos “conformados” semicompactos	26
250-550	Materia arenoso color grisáceo oscuro, con finas partículas amarillentas, presenta bloques de suelo semicompactos muy fino (tipo sedimento) color café claro a lo largo del estrato, prevalecen en mayor cantidad en la última capa del estrato (500 cm – 550 cm)	64

*Nota: Entre las profundidades 405 cm – 450 cm, se detectó la presencia de nivel freático.



Tabla 6. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 3 (M-1366-2023)

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N _{spt} (promedio)
0-200	Estrato 100 % rocoso, color grisáceo verdusco claro, prevalecen gruesos de hasta 25 mm de diámetro muy compactos, con formas cúbicas y redondeadas, con pocos finos arenosos	64

*Nota: No se detectó la presencia de nivel freático.

Tabla 7. Descripción del material encontrado en sitio en la perforación 4 (M-1364-2023)

Profundidad (cm)	Descripción de campo	N _{spt} (promedio)
0-100	Material arenoso muy fino (color negro), altamente cargado de finos "metálicos" negruzcos y plateados	7
100-250	Arena de grano mediano y fino muy limpia, presenta partículas ligeras (conchas quebradas) y rastros de suelos cohesivos (sedimentos) poco o nada plásticos	5
250-950	Material arenoso de grano fino, mediano y grueso, con partículas de roca de hasta 1/4 in de diámetro, color grisáceo claro mayormente redondeadas, muy compactas con poco rastro de suelo cohesivo a lo largo del estrato	19

*Nota: Entre las profundidades 225 cm – 270 cm, se detectó la presencia de nivel freático.

IV.2 Ensayos de caracterización del material

Los ensayos que se muestran en este apartado son indispensables para una adecuada caracterización de los suelos de la zona de estudio. Esta es fundamental para conocer las características de su comportamiento ante el fenómeno de licuación. Los resultados de estos ensayos se muestran en los siguientes apartados.

IV.2.1 ASTM D2216 Procedimiento para determinar el contenido de humedad de suelos y rocas

El contenido de humedad de los materiales muestreados se presenta a continuación.

Tabla 8. Contenido de humedad para las muestras indicadas

Muestra	Humedad natural (%)		
	Capa1	Capa 2	Capa 3
M-1365-2023	8,8	9,9	11,3
M-1385-2023	11,2	13,6	13,4
M-1366-2023	7,1		
M-1367-2023	5,3	24,7	15,5

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 16 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------

Como puede observarse, los contenidos de humedad de los materiales son variables, por lo que se presume que los materiales no cuentan con una condición de homogeneidad en el sitio.

IV.2.2 ASTM D4318 Procedimiento para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de un suelo

Los límites de Atterberg encontrados en los distintos materiales se clasifican como no plásticos para todos los casos, ver Tabla 9. Por lo tanto, al clasificar los materiales en la carta de plasticidad modificada con el criterio de Seed et al., en la cual los suelos susceptibles a licuación se encuentran dentro de la zona A (zona azul), o en la zona B, mientras que la zona C no presenta potencial de licuación. Los resultados de los suelos muestreados se presentan en la

Figura 5 :

Tabla 9. Resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Muestra	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad
M-1365-2023	NP	NP	NP
M-1385-2023	NP	NP	NP
M-1366-2023	NP	NP	NP
M-1367-2023	NP	NP	NP

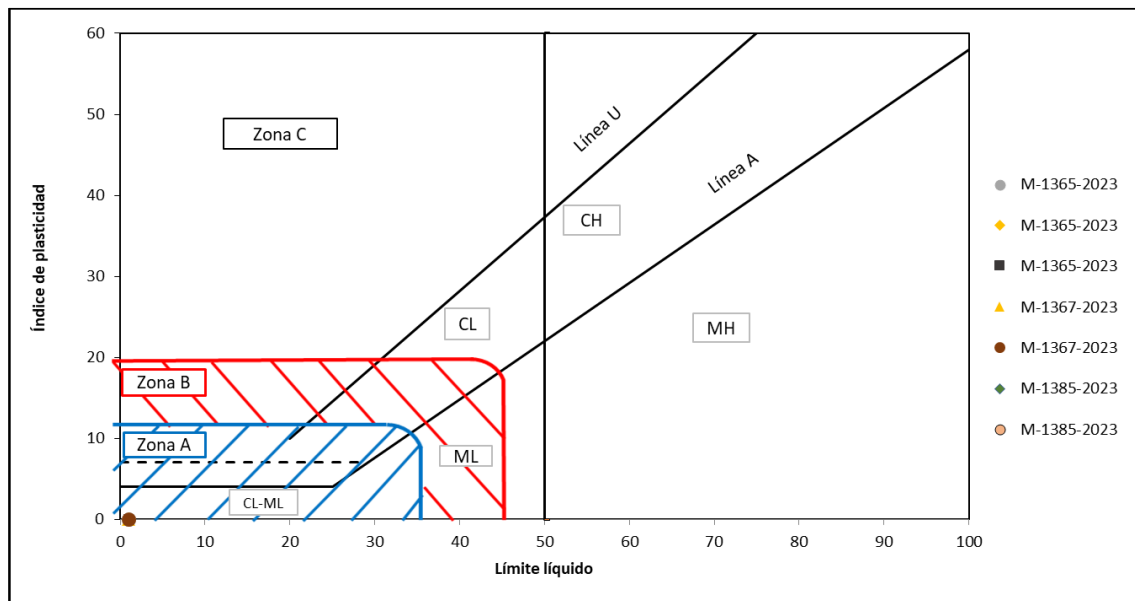


Figura 5. Clasificación de los materiales con la carta de plasticidad de Casagrande

IV.2.3 ASTM D1140 Métodos de ensayo estándar para determinar la cantidad de material más fino que el tamiz 75 μm (N° 200) en suelos mediante lavado

En la Tabla 10 se encuentran los resultados del material más fino que el tamiz No. 200

Tabla 10. Porcentaje de material más fino que el tamiz de 75 μm (N° 200)

Muestra	Material más fino que 75 μm (No. 200)		
	Capa 1	Capa 2	Capa 3
M-1365-2023	6,5	6,4	12,3
M-1385-2023		18,4	9,2
M-1366-2023	13,7		
M-1367-2023	5,5	13,0	6,6

IV.2.4 ASTM D6913 Método de ensayo para el análisis de tamaño de partículas de suelo (utilizando tamices)

A continuación, se muestra la distribución del tamaño de partículas que conforman las muestras M-1365-2023, M-1385-2023, M-1366-2023 y M-1367-2023. Para cada una se indica se indica en la Tabla 11 el respectivo D_{50} , que corresponde al diámetro de partícula en el que se retiene el 50% del material.

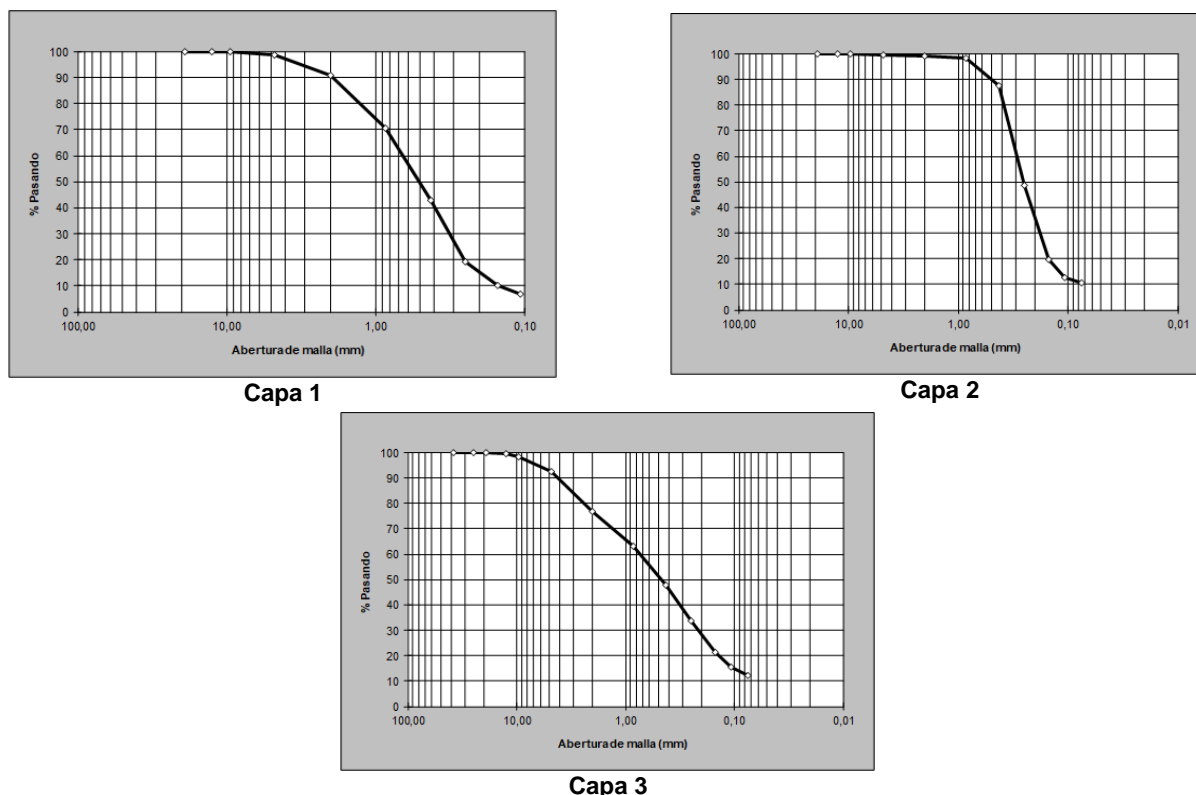
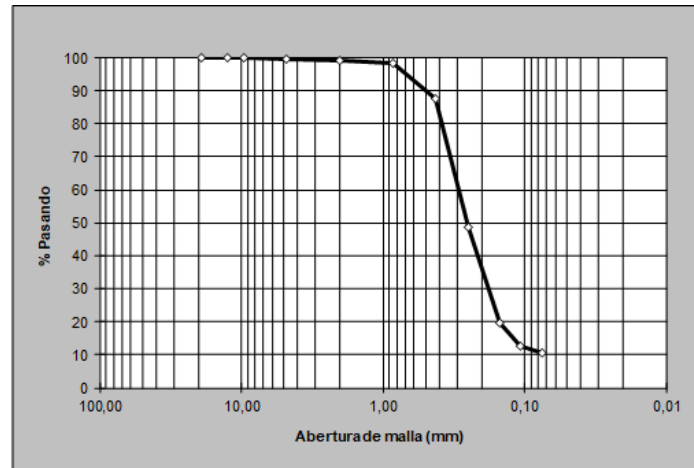
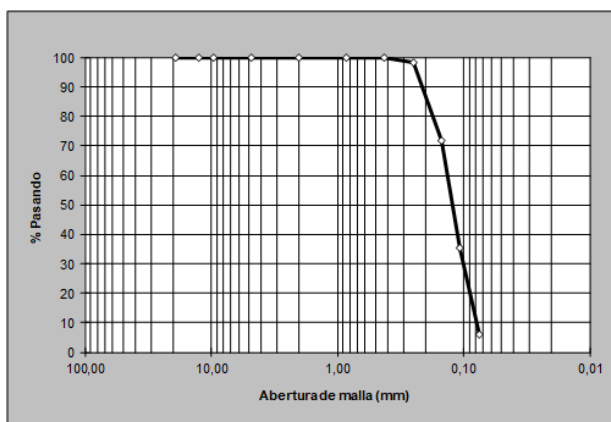


Figura 6. Curvas granulométricas, Muestra M-1365-2023

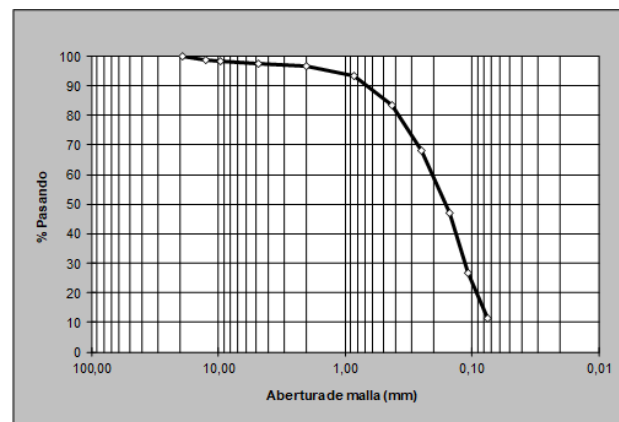


Capas 2 y 3

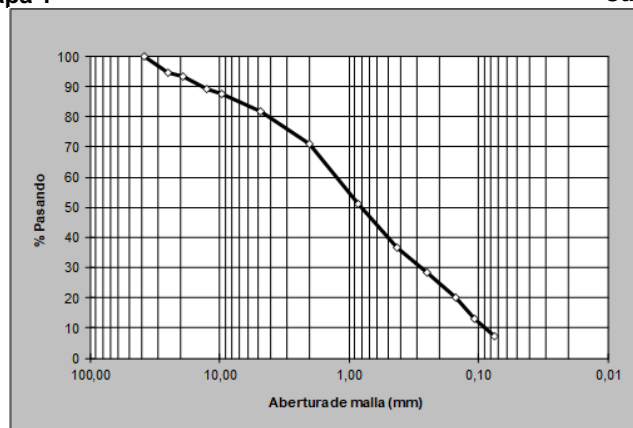
Figura 7. Curva granulométrica, Muestra M-1385-2023



Capa 1



Capa 2



Capa 3

Figura 8. Curva granulométrica, Muestra M-1367-2023



Tabla 11. Diámetro de partícula en el que se retiene el 50% del material (D_{50})

Muestra	Diámetro de partícula D_{50}		
	Capa 1	Capa 2	Capa 3
M-1365-2023	0,314	2,333	0,494
M-1385-2023	-	0,257	2,333
M-1366-2023	-	-	-
M-1367-2023	0,137	0,166	0,765

IV.2.5 ASTM C29 Método de prueba estándar para determinar la densidad a granel (“peso unitario”) y los huecos de aire de un agregado

Al realizar el ensayo correspondiente esta norma se obtuvieron los resultados de densidad de suelo que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Densidad para las muestras indicadas

Muestra	Densidad masiva (t/m^3)		
	Capa 1	Capa 2	Capa 3
M-1365-2023	15,8	17,7	16,3
M-1385-2023	-	13,4	17,0
M-1366-2023	15,0	-	-
M-1367-2023	21,0	10,1	16,1

V. Análisis del potencial de licuación

Partiendo de los resultados obtenidos en el laboratorio y en concordancia con los mapas de zonificación del Código de cimentaciones de Costa Rica (CCCR), ver Figura 9, la zona donde se ubican las perforaciones se caracteriza por la presencia de suelos clasificados como Sat, Lat, Roc, Lic y Am, que en general son no plásticos aluviales saturados, con susceptibilidad a licuarse, poco consolidados y con nivel freático superficial.

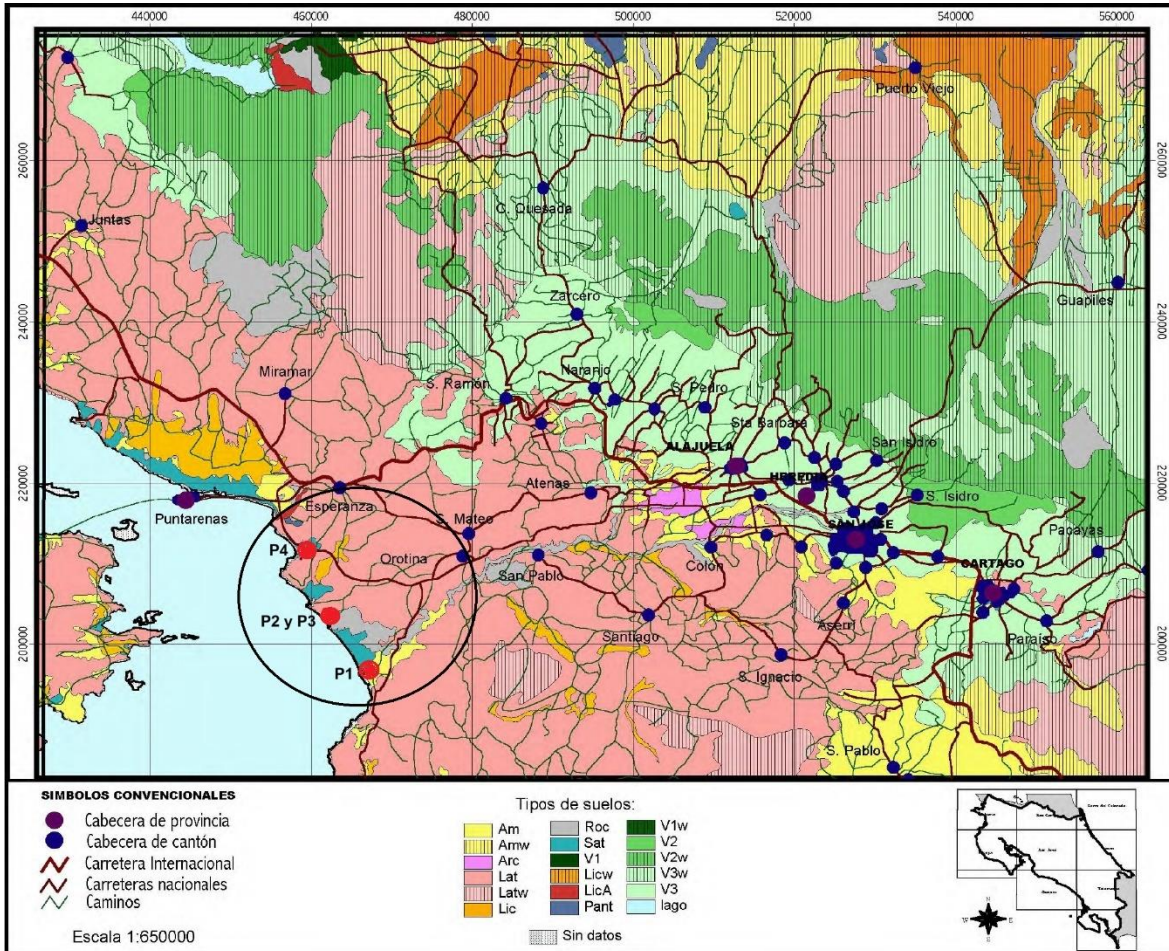


Figura 9. Tipos de suelo de la hoja San José
Fuente: Código de Cimentaciones de Costa Rica (2015)

Usualmente los suelos potencialmente licuables deben tener las siguientes características:

- Estar en estado suelto
- Estar saturados
- Que los finos sean no plásticos
- Que correspondan con arenas uniformes, pudiendo tener gravas y gravillas

Para los análisis de susceptibilidad al fenómeno de licuación se toma como base la metodología de Seed & Idriss, tomando como base una aceleración máxima horizontal de 0,15 g y un sismo de magnitud 7,5.

V.1 Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 1

Para el caso de la perforación 1, ubicada en la zona cercana al puerto Caldera, se observa en la Tabla 13 y Figura 10, que prácticamente para la profundidad total de la perforación no se encuentran estratos susceptibles al fenómeno de licuación, a excepción de los primeros 50 cm de suelo, que se



obtiene un FS de 0,85, sin embargo, al ser una capa superficial, de poco espesor y sin presencia de nivel freático, no representa un riesgo para las estructuras cercanas.

Tabla 13. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 1

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS
De	Hasta							
0,0	0,5	3	1,58	6,5	0,08	0,12	0,10	0,85
0,5	1,0	20	1,58	6,5	0,40	0,23	0,10	4,17
1,0	1,5	16	1,58	6,5	0,24	0,35	0,10	2,57
1,5	2,0	12	1,58	6,5	0,17	0,46	0,09	1,85
2,0	2,5	17	1,58	6,5	0,23	0,57	0,09	2,40
2,5	3,0	15	1,58	6,5	0,18	0,68	0,09	1,97
3,0	3,5	30	1,58	6,5	0,58	0,78	0,09	6,26
3,5	4,0	34	1,58	6,5	0,84	0,89	0,09	9,14
4,0	4,5	30	1,77	6,4	0,45	1,01	0,10	4,59
4,5	5,0	20	1,77	6,4	0,20	1,12	0,10	1,97
5,0	5,5	20	1,77	6,4	0,20	1,23	0,11	1,84
5,5	6,0	19	1,77	6,4	0,18	1,34	0,11	1,65
6,0	6,5	23	1,77	6,4	0,22	1,45	0,11	1,93
6,5	7,0	31	1,79	6,4	0,37	1,56	0,12	3,17
7,0	7,5	24	1,63	12,3	0,26	1,66	0,12	2,14
7,5	8,0	37	1,63	12,3	0,95	1,75	0,12	7,75
8,0	8,5	50	1,63	12,3	12,51	1,84	0,13	100
8,5	9,0	27	1,63	12,3	0,29	1,93	0,13	2,31
9,0	9,5	50	1,63	12,3	12,87	2,02	0,13	100

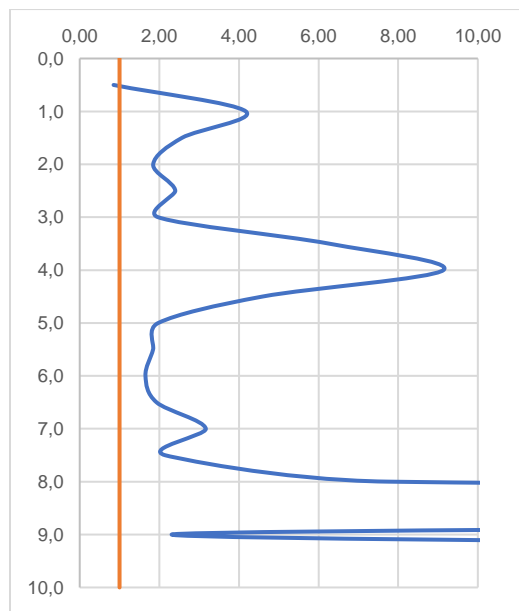


Figura 10. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 1



De manera complementaria se realiza el análisis para determinar la susceptibilidad al fenómeno de licuación utilizando un software especializado, el cual aplica diferentes metodologías. Como se puede observar en la Figura 11, los análisis únicamente toman en consideración las capas de suelo saturadas por el nivel freático. Los resultados obtenidos concuerdan con los resultados de Seed & Idriss mostrados anteriormente, con factores de seguridad ante el fenómeno de licuación superiores a la unidad. En la Figura 11 E y F, se muestra tal y como es de esperarse que el desplazamiento lateral y los asentamientos sean cero, ya que ante un sismo de magnitud 7,5 con aceleración máxima de 0,15 g, los suelos de este sitio no se verán afectados por el fenómeno de licuación.

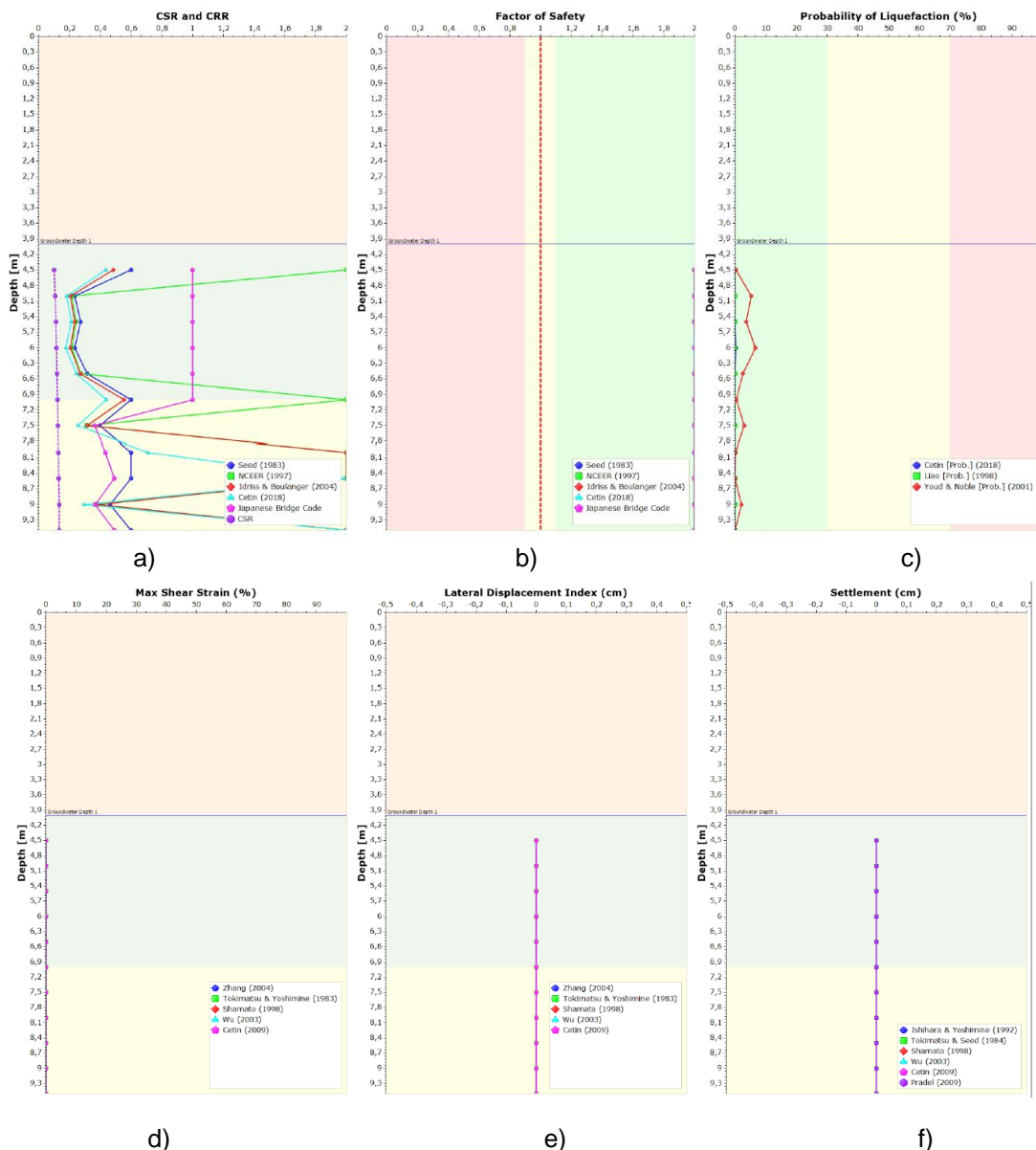


Figura 11. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 1

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 23 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------



V.2 Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 2

En el caso de la perforación 2, ubicada en el patio de la Escuela Regional de Caldera, el factor de seguridad obtenido para determinar la susceptibilidad de los suelos recuperados en esta perforación se muestra para cada capa en la Tabla 14 y gráficamente en la Figura 12. Bajo los criterios de Seed & Idriss, se encuentra que la capa de 1 m de espesor comprendida entre 50 cm y 1,50 m, sin embargo, al tratarse de una capa superficial no afectada por el nivel freático se considera bajo criterio técnico que la afectación que pueda tener la ocurrencia del fenómeno de licuación en esta capa es baja.

Tabla 14. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 2

Profundidad		N in situ	Y	CF	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS
De	Hasta	-	(t/m ³)	%				
0,0	0,5	5	1,39	18,4	0,13	0,10	0,10	1,31
0,5	1,0	1	1,39	18,4	0,09	0,21	0,10	0,93
1,0	1,5	0	1,39	18,4	0,08	0,31	0,10	0,85
1,5	2,0	9	1,39	18,4	0,17	0,41	0,09	1,83
2,0	2,5	18	1,39	18,4	0,37	0,50	0,09	3,94
2,5	3,0	26	1,70	9,2	0,52	0,62	0,09	5,60
3,0	3,5	32	1,70	9,2	1,00	0,74	0,09	10,78
3,5	4,0	47	1,70	9,2	9,17	0,85	0,09	100
4,0	4,5	41	1,70	9,2	4,56	0,96	0,10	46,50
4,5	5,0	50	1,70	9,2	10,36	1,07	0,10	100
5,0	5,5	50	1,70	9,2	10,84	1,18	0,11	100

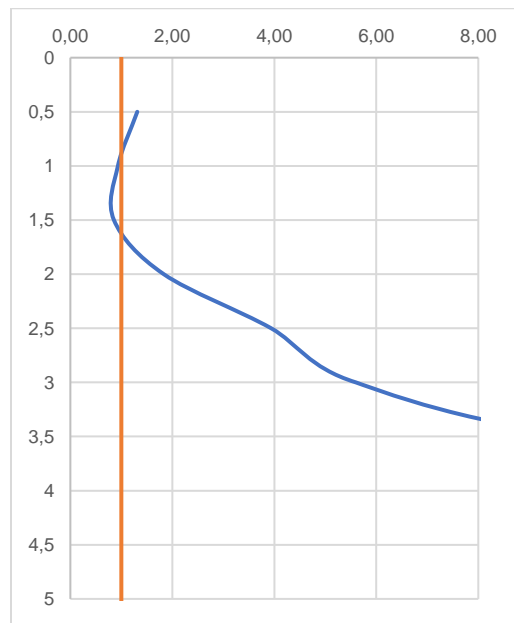


Figura 12. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 2



Al igual que para la perforación anterior, de manera complementaria se realiza el análisis para determinar la susceptibilidad al fenómeno de licuación utilizando un software especializado, el cual aplica diferentes metodologías.

Como se puede observar en la Figura 13 , los análisis únicamente toman en consideración las capas de suelo saturadas por el nivel freático y al igual que con la metodología mostrada anteriormente el FS obtenido es superior o igual a la unidad y la probabilidad de ocurrencia del fenómeno es prácticamente nula. Sin embargo, dada la composición del suelo, ante un sismo con una aceleración máxima de 0,15 g, puede ocurrir a una profundidad de 4,5 m aproximadamente desplazamientos laterales inferiores a 3,5 cm y asentamientos inferiores a 1 cm.

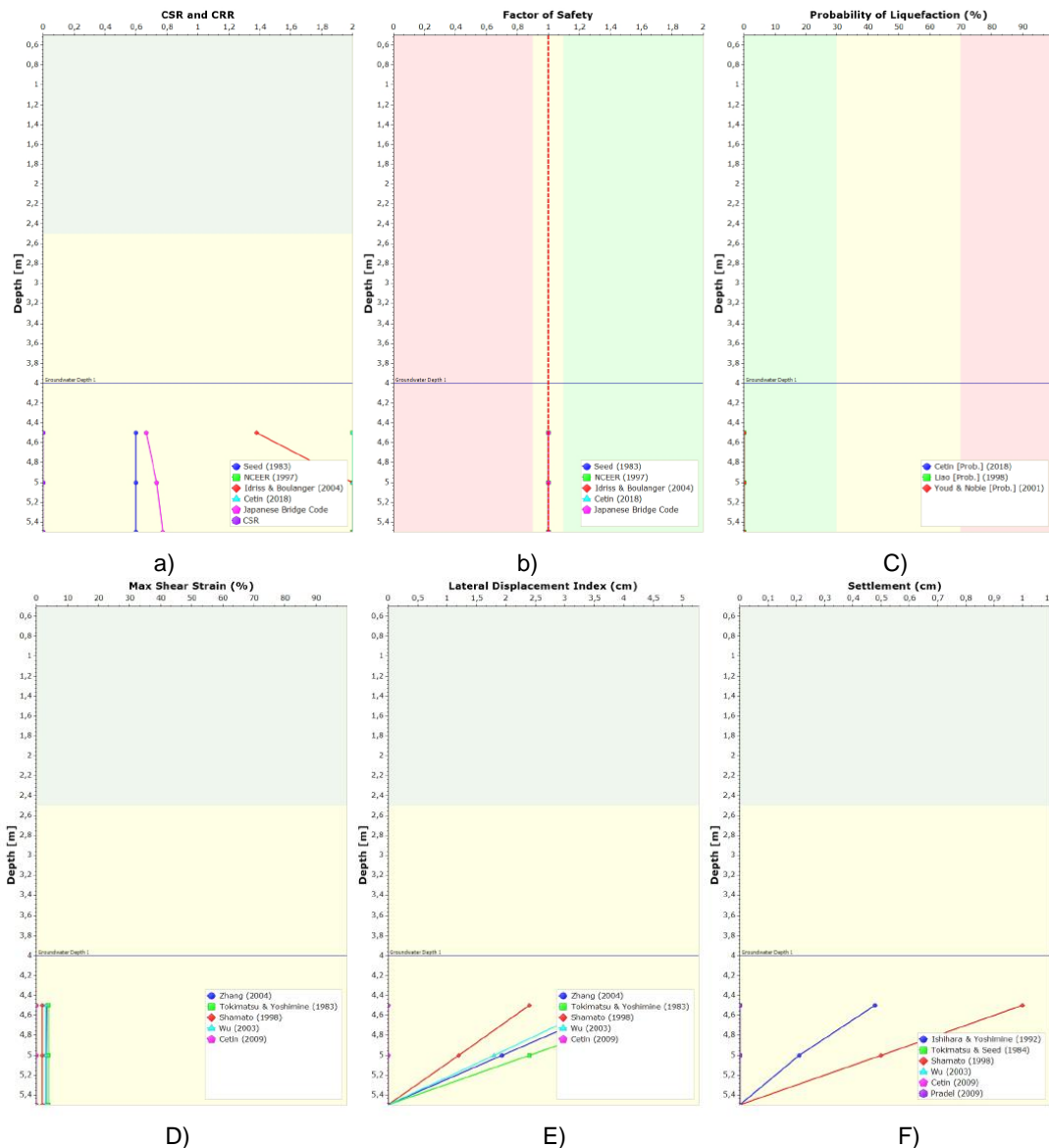


Figura 13. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 2

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 25 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------



V.3 Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 3

En el caso del sitio de la perforación 3, ubicado en la margen de la carretera, se obtienen al aplicar la metodología de Seed & Idriss que, a la profundidad alcanzada por la perforación, no se presenta susceptibilidad al fenómeno de licuación, tal y como se muestran los resultados en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 3

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS
De	Hasta							
0,0	0,5	50	1,50	13,7	9,68	0,11	0,10	100
0,5	1,0	50	1,50	13,7	9,60	0,22	0,10	100
1,0	1,5	36	1,50	13,7	9,53	0,33	0,10	100
1,5	2,0	50	1,50	13,7	9,46	0,44	0,09	100

V.4 Determinación del factor de seguridad ante licuación para la perforación 4

Finalmente, en el caso de la perforación del sitio 4, ubicada en el bastión de la margen izquierda del puente sobre el río Barranca, los resultados del análisis con la metodología de Seed & Idriss se muestran en la Tabla 16 y Figura 14. Se registra la presencia del nivel freático a partir de la profundidad de 2,5 m. Sobre el nivel freático, se tiene una capa de 50 cm de material con susceptibilidad al fenómeno de licuación, sin embargo, dado que no se ve afectada por el nivel freático y su espesor, no se considera que represente un riesgo para las estructuras cercanas.

Se puede observar que a partir de la profundidad de 8,0 m se encuentra un estrato que abarca hasta el final de la profundidad de la perforación que tiene factores de seguridad inferiores a 1,1 lo que resulta en susceptibilidad de estos estratos a la ocurrencia del fenómeno de licuación.



Tabla 16. Resultados del FS ante licuación para el suelo de la perforación 4

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS
De	Hasta							
0,0	0,5	6	2,10	5,5	0,11	0,16	0,10	1,12
0,5	1,0	8	2,10	5,5	0,13	0,31	0,10	1,33
1,0	1,5	5	1,01	13	0,12	0,38	0,10	1,21
1,5	2,0	3	1,01	13	0,10	0,45	0,09	1,02
2,0	2,5	7	1,01	13	0,14	0,52	0,09	1,45
2,5	3,0	17	1,01	13	0,28	0,59	0,11	2,65
3,0	3,5	13	1,60	6,6	0,17	0,70	0,12	1,51
3,5	4,0	6	1,61	6,6	0,11	0,81	0,12	0,86
4,0	4,5	12	1,61	6,6	0,16	0,91	0,13	1,19
4,5	5,0	17	1,61	6,6	0,20	1,02	0,14	1,50
5,0	5,5	21	1,61	6,6	0,26	1,12	0,14	1,81
5,5	6,0	28	1,61	6,6	0,46	1,22	0,15	3,16
6,0	6,5	38	1,61	6,6	2,31	1,32	0,15	15,50
6,5	7,0	22	1,61	6,6	0,25	1,42	0,15	1,64
7,0	7,5	17	1,61	6,6	0,18	1,51	0,15	1,17
7,5	8,0	15	1,61	6,6	0,16	1,61	0,16	1,03
8,0	8,5	23	1,61	6,6	0,24	1,70	0,16	1,54
8,5	9,0	16	1,61	6,6	0,16	1,79	0,16	1,02
9,0	9,5	15	1,61	6,6	0,15	1,88	0,16	0,95

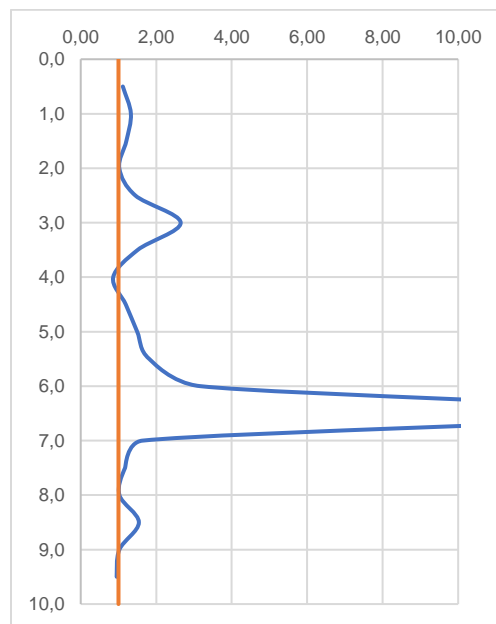


Figura 14. Gráfico de FS ante licuación con el método de Seed & Idriss para la perforación 4

Por último, y de manera complementaria, se realizó el análisis utilizando el software especializado en análisis de licuación, para determinar mediante diferentes metodologías el factor de seguridad ante licuación, la probabilidad de ocurrencia y el desplazamiento lateral y asentamientos para

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 27 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------

aqueños estratos con FS inferiores a 1,1. En la Figura 15 b y c, se muestran los resultados para los FS y probabilidad de licuación de las capas saturadas por el nivel freático.

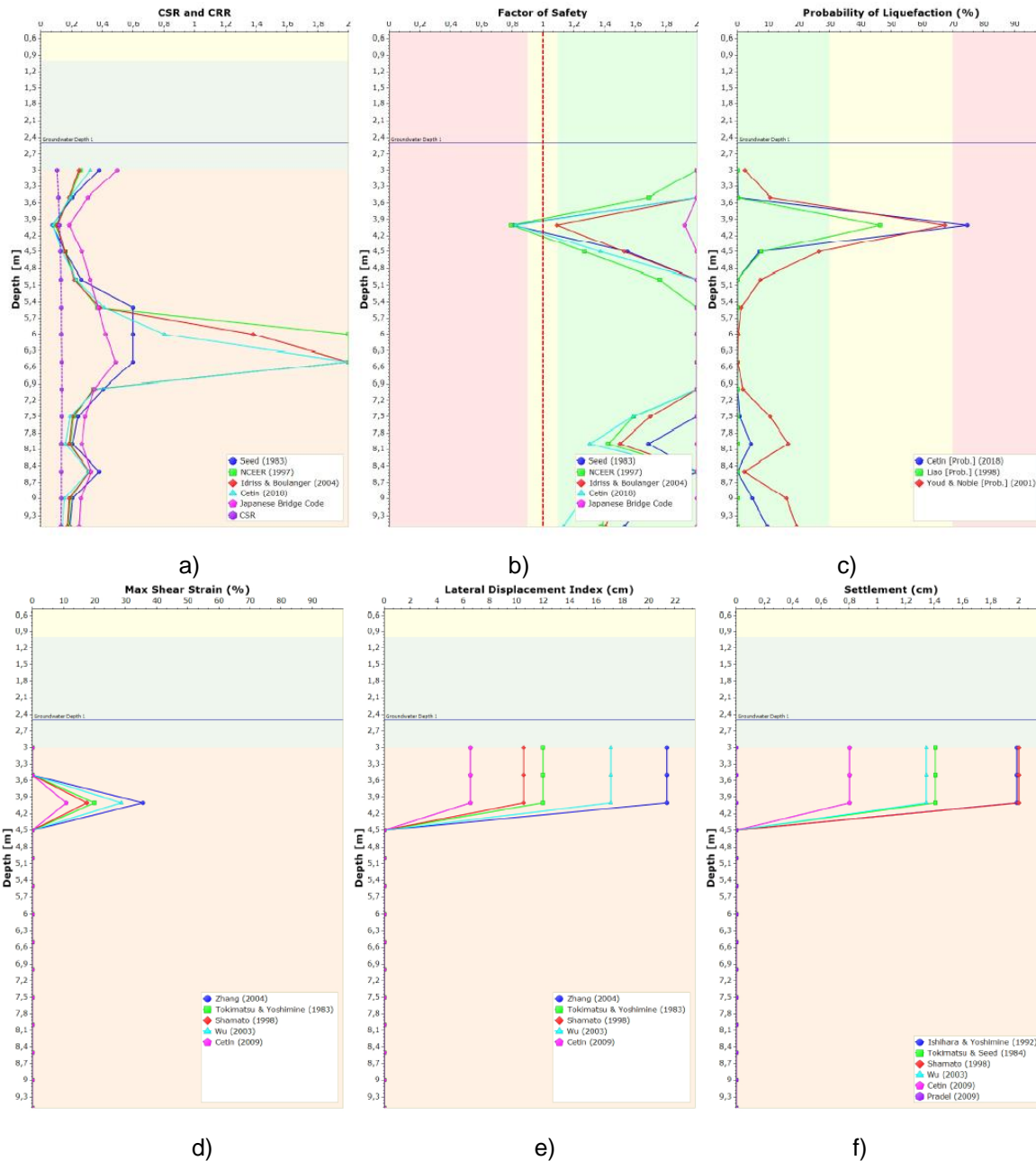


Figura 15. Resultados de susceptibilidad a licuación aplicando diferentes metodologías haciendo uso de un software especializado en licuación de suelos para la perforación 4

En cuanto a los desplazamientos laterales y asentamientos resultantes luego de la ocurrencia del fenómeno de licuación ocasionado por un sismo con la carga mencionada anteriormente, se tiene



que se pueden llegar a registrar desplazamientos laterales de hasta 22 cm y asentamientos de máximo 2 cm.

VI. Análisis de licuación con ajuste por magnitud del sismo

Debido a que las metodologías descritas en apartados anteriores fueron desarrolladas tomando en consideración un sismo de magnitud 7,5, el cual representa una fuerte aceleración en el terreno, los resultados obtenidos se consideran conservadores por lo que, con el objetivo de simular en los análisis condiciones lo más cercanas a la realidad posibles del sitio, se realiza el ajuste por magnitud del sismo a los resultados obtenidos en las perforaciones 1, 2 y 4, la perforación 3 no se corrige por magnitud del sismo dada su composición el material recuperado y caracterizado no es susceptible a la licuación.

Según los registros históricos el sismo de Cóbano de 1990 tuvo una magnitud de 6,8 según el OVSICORI y de 7,0 según el CMT, por lo que se aplican los respectivos factores MSF indicados en la Tabla 2. Es importante resaltar que la aceleración máxima y los daños reportados se ubican en los alrededores del hospital de Puntarenas, ubicado aproximadamente a 15 km del sitio de la perforación 1.

En la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19, se presentan los resultados de factor de seguridad corregidos por el factor de magnitud del sismo (MSF), suponiendo un sismo de magnitud 6,5 y 7,0 respectivamente.

Tabla 17. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 1

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS	FS _{MSF} 6,5	FS _{MSF} 7,0
De	Hasta									
0,0	0,5	3	1,58	6,5	0,08	0,12	0,10	0,85	1,01	0,92
0,5	1,0	20	1,58	6,5	0,40	0,23	0,10	4,17	4,96	4,51
1,0	1,5	16	1,58	6,5	0,24	0,35	0,10	2,57	3,06	2,77
1,5	2,0	12	1,58	6,5	0,17	0,46	0,09	1,85	2,20	1,99
2,0	2,5	17	1,58	6,5	0,23	0,57	0,09	2,40	2,86	2,59
2,5	3,0	15	1,58	6,5	0,18	0,68	0,09	1,97	2,34	2,13
3,0	3,5	30	1,58	6,5	0,58	0,78	0,09	6,26	7,45	6,76
3,5	4,0	34	1,58	6,5	0,84	0,89	0,09	9,14	10,87	9,87
4,0	4,5	30	1,77	6,4	0,45	1,01	0,10	4,59	5,47	4,96
4,5	5,0	20	1,77	6,4	0,20	1,12	0,10	1,97	2,35	2,13
5,0	5,5	20	1,77	6,4	0,20	1,23	0,11	1,84	2,19	1,99
5,5	6,0	19	1,77	6,4	0,18	1,34	0,11	1,65	1,96	1,78
6,0	6,5	23	1,77	6,4	0,22	1,45	0,11	1,93	2,30	2,08
6,5	7,0	31	1,79	6,4	0,37	1,56	0,12	3,17	3,77	3,42
7,0	7,5	24	1,63	12,3	0,26	1,66	0,12	2,14	2,55	2,32
7,5	8,0	37	1,63	12,3	0,95	1,75	0,12	7,75	9,23	8,37
8,0	8,5	50	1,63	12,3	12,51	1,84	0,13	100	100	100
8,5	9,0	27	1,63	12,3	0,29	1,93	0,13	2,00	3,00	2,00
9,0	9,5	50	1,63	12,3	12,87	2,02	0,13	100	100	100



Tabla 18. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 2

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS	FS _{MSF} 6,5	FS _{MSF} 7,0
De	Hasta									
0,0	0,5	5	1,39	18,4	0,13	0,10	0,10	1,31	1,56	1,42
0,5	1,0	1	1,39	18,4	0,09	0,21	0,10	0,93	1,11	1,01
1,0	1,5	0	1,39	18,4	0,08	0,31	0,10	0,85	1,02	0,92
1,5	2,0	9	1,39	18,4	0,17	0,41	0,09	1,83	2,18	1,98
2,0	2,5	18	1,39	18,4	0,37	0,50	0,09	3,94	4,69	4,25
2,5	3,0	26	1,70	9,2	0,52	0,62	0,09	5,60	6,67	6,05
3,0	3,5	32	1,70	9,2	1,00	0,74	0,09	10,78	12,83	11,64
3,5	4,0	47	1,70	9,2	9,17	0,85	0,09	100	100	100
4,0	4,5	41	1,70	9,2	4,56	0,96	0,10	46,50	55,33	50,22
4,5	5,0	50	1,70	9,2	10,36	1,07	0,10	100	100	100
5,0	5,5	50	1,70	9,2	10,84	1,18	0,11	100	100	100

Tabla 19. Resultados del FS ante licuación corregido por MSF para el suelo de la perforación 3

Profundidad		N in situ	Y (t/m ³)	CF %	CCR M=7.5	t _{max}	CSR M=7.5	FS	FS _{MSF} 6,5	FS _{MSF} 7,0
De	Hasta									
0,0	0,5	6	2,10	5,5	0,11	0,16	0,10	1,12	1,33	1,20
0,5	1,0	8	2,10	5,5	0,13	0,31	0,10	1,33	1,58	1,44
1,0	1,5	5	1,01	13	0,12	0,38	0,10	1,21	1,44	1,31
1,5	2,0	3	1,01	13	0,10	0,45	0,09	1,02	1,22	1,10
2,0	2,5	7	1,01	13	0,14	0,52	0,09	1,45	1,72	1,56
2,5	3,0	17	1,01	13	0,28	0,59	0,11	2,65	3,15	2,86
3,0	3,5	13	1,60	6,6	0,17	0,70	0,12	1,51	1,80	1,63
3,5	4,0	6	1,61	6,6	0,11	0,81	0,12	0,86	1,02	0,93
4,0	4,5	12	1,61	6,6	0,16	0,91	0,13	1,19	1,42	1,29
4,5	5,0	17	1,61	6,6	0,20	1,02	0,14	1,50	1,78	1,61
5,0	5,5	21	1,61	6,6	0,26	1,12	0,14	1,81	2,16	1,96
5,5	6,0	28	1,61	6,6	0,46	1,22	0,15	3,16	3,76	3,41
6,0	6,5	38	1,61	6,6	2,31	1,32	0,15	15,50	18,44	16,74
6,5	7,0	22	1,61	6,6	0,25	1,42	0,15	1,64	1,95	1,77
7,0	7,5	17	1,61	6,6	0,18	1,51	0,15	1,17	1,40	1,27
7,5	8,0	15	1,61	6,6	0,16	1,61	0,16	1,03	1,22	1,11
8,0	8,5	23	1,61	6,6	0,24	1,70	0,16	1,54	1,83	1,66
8,5	9,0	16	1,61	6,6	0,16	1,79	0,16	1,02	1,22	1,11
9,0	9,5	15	1,61	6,6	0,15	1,88	0,16	0,95	1,13	1,03

Como se observa en los resultados obtenidos, los factores de seguridad aumentan al aplicar una magnitud de sismo menor, sin embargo, las capas que presentan susceptibilidad a la licuación persisten, aunque con FS más cercano al mínimo requerido, por lo anterior se considera oportuno tomar en consideración el fenómeno de licuación para el diseño de las soluciones geotécnicas que se implementen en la zona.



VII. Comentarios finales

Una vez realizado el análisis de la información obtenida en este informe, es importante indicar que este análisis no representa los resultados definitivos, ya que se fundamenta en una exploración geotécnica limitada. No obstante, ante los resultados obtenidos, es importante destacar que un estudio más detallado y exhaustivo debe ser realizado para emitir las propuestas e implementación de obras de mejoramiento y protección de las estructuras cercanas a los sitios analizados. Sin embargo, se espera que el presente informe, se constituya como un insumo y una guía que pueden ser tomados en consideración para llevar a cabo estos análisis y con ello evaluar las afectaciones que de ser el caso pueda sufrir una infraestructura cercana a los sitios susceptibles al fenómeno de licuación.

A partir de los resultados de la exploración geotécnica, para las propiedades de los materiales obtenidos mediante los ensayos de clasificación realizados en el Laboratorio de Geotecnia de LanammeUCR, disponibles detalladamente en el informe EIC-Lanamme-INF-1155-2023, los sitios de las perforaciones 1 y 3 presentan estratos aleatorios susceptibles a la ocurrencia del fenómeno de licuación, sin embargo, dado su reducido espesor y su profundidad, no se considera bajo criterio geotécnico que representen una amenaza significativa para las estructuras cercanas en cuanto a afectación por la ocurrencia de dicho fenómeno.

Por su parte la perforación 4, ubicada en la margen izquierda del puente sobre el río Barranca, presenta susceptibilidad al fenómeno de licuación en capas profundas, específicamente a partir de los 8,0 m, en las cuales se obtuvieron FS mayores que 1,1. Según los resultados obtenidos con la herramienta especializada en análisis de licuación, en caso de presentarse el sismo de análisis con una aceleración de 0,15 g, las capas susceptibles al fenómeno de licuación pueden sufrir desplazamientos laterales de hasta 20 cm y asentamientos de máximo 2 cm.

Al considerar el factor de ajuste por magnitud del sismo MSF, tomando como base el sismo de Cóbano 1990, con magnitud de 6,8 según el OBVSICORI y 7,0 según el CMT, es posible concluir que existen capas susceptibles al fenómeno de licuación en las perforaciones 1,2 y 4. Cabe resaltar que dada la presencia de estratos susceptibles al fenómeno de licuación ubicados por encima del nivel freático detectado en el momento de la perforación, se considera apropiado monitorear y tomar en consideración estas capas como licuables, ya que si bien no se encuentran saturadas por el nivel freático, el incremento en el nivel del mar y el oleaje ocasiona periodos de inundación que pueden llegar a saturar el material y por ende incrementar la susceptibilidad a la ocurrencia del fenómeno de licuación.

Debido a lo anterior, se resalta la importancia de realizar un análisis exhaustivo con una mayor exploración geotécnica, acompañado por el criterio de un profesional especialista en geotecnia para la decisión de la implementación de las soluciones ante el constante incremento de los oleajes en la zona, ya que al incrementar el nivel del mar, como se indica por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés), debido al aumento de temperatura del mar costarricense que conlleva al aumento en el nivel del mar de por lo menos 15 a 20 centímetros, ante un leve incremento del oleaje se supere el nivel del rompeolas, alcanzando la calzada y contribuyendo a la saturación del medio saturando los estratos de capas más superficiales y que como se observó en los resultados preliminares de este análisis pueden resultar susceptibles al fenómeno de licuación, ocasionado desplazamientos laterales y asentamientos que pueden afectar el tramo de la carretera de la Ruta Nacional 23 y estructuras cercanas.

Informe EIC-Lanamme-INF-1240-2023	setiembre, 2023	Página 31 de 32
-----------------------------------	-----------------	-----------------



VIII. Referencias

1. Asociación de geotecnia (2009). Código de Cimentaciones de Costa Rica. Tecnológico de Costa Rica
2. Idriss IM, Boulanger RW., Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proc., 11th International conference on soil dynamics and earthquake engineering, and 3rd International conference on earthquake geotechnical engineering, vol. Stallion Press; 2004. p. 32–56
3. Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.
4. Santana, G (Ed): Sismo de Cóbano 25 de marzo de 1990 Efectos sobre Suelos y edificaciones, Reporte INII 49-90, 1990