

Herramienta para el análisis de licuación de suelos a partir de una columna estratigráfica

A tool for the analysis of soil liquefaction from a stratigraphic column

*Delybeth Jiménez¹, Francisco Grajales-Saavedra¹ **

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de ingeniería civil, Grupo de Investigación en Geotecnia Aplicada, Panamá

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2022. **Fecha de aceptación:** 29 de marzo de 2023.

***Autor de correspondencia:** francisco.grajales@utp.ac.pa

Resumen. Este estudio tiene como objetivo evaluar las metodologías disponibles para estimar el potencial de licuación de suelos utilizando como caso de estudio, la Ciudad de David. En primera instancia, se realizó una revisión bibliográfica de ocurrencia de sismos a nivel mundial donde se registró el fenómeno de Licuación; también se identificaron metodologías aplicables para determinar el Potencial de Licuación. Luego, se creó y analizó una base de datos de sondeos realizados en la Ciudad de David y se evaluó el Potencial de Licuación en diferentes condiciones para uno de estos sondeos implementando una hoja de cálculo creada con los métodos aplicables. Los resultados indicaron que, a mayor magnitud del sismo, mayor era el potencial de licuación para las condiciones evaluadas. Se espera que este estudio sirva como punto de partida para crear una metodología que permita evaluar la vulnerabilidad sísmica de tuberías de agua potable en diferentes áreas del país, como parte importante en el Proyecto IOMA 19-011 “Vulnerabilidad Sísmica de Redes de Agua Potable en Panamá”. Se recomienda analizar otros fenómenos que son consecuencias de los sismos y realizar una caracterización apropiada de las áreas que se definan para realizar los estudios, creando bases de datos que puedan ser utilizadas por diferentes investigadores que deseen cooperar con sus conocimientos y habilidades.

Palabras clave. Ciudad de David, licuación, sismos, suelo.

Abstract. This study aims to evaluate the available methodologies to estimate the liquefaction potential of soils implementing them in David City, as a case of study. First, a bibliographic review of the occurrence of earthquakes worldwide where liquefaction of soil was recorded was carried out, identifying applicable methodologies to determine the liquefaction potential of soils. Then, a database of boreholes performed in David City was created and analyzed and the liquefaction potential was evaluated under different conditions for one of these boreholes by implementing a spreadsheet created with the applicable methods. The results indicated that the greater the magnitude of the earthquake, the greater the liquefaction potential for the conditions evaluated. It is expected that this study will be a starting point to create a methodology that allows evaluating the seismic vulnerability of drinking water pipes in different areas of the country, as part of the IOMA 19-011 Project "Seismic Vulnerability of Drinking Water Networks in Panama". It is recommended to analyze other phenomena that are consequences of earthquakes and carry out an appropriate characterization of the areas that are defined to perform the studies, creating databases that can be used by different researchers who want to cooperate with their knowledge and skills.

Keywords. David City, liquefaction, earthquakes, soil.

1. Introducción

En una situación de emergencia causada por un fenómeno natural es indispensable suministrar a la población de los recursos básicos para subsistir, tendiendo a darle mayor importancia a productos de primera necesidad como alimento, ropa, medicina, refugio, etc. Sin embargo, la falta de abastecimiento de agua potable y saneamiento puede agravar más las consecuencias, ya que ante un sistema defectuoso o contaminado de agua potable es más sencilla la propagación de enfermedades [1].

Existen fenómenos naturales capaces de generar grandes consecuencias que no son tomados en cuenta en los códigos para el diseño de las tuberías que forman parte de los sistemas de distribución de agua potable. Estos fenómenos, llamados sismos o terremotos, son producidos por el movimiento de las placas tectónicas o actividad volcánica, los cuales generan ondas que se propagan a través del suelo. Los sismos siempre han sido una preocupación para el hombre debido al daño material y pérdida de vidas que pueden ocasionar.

Durante los terremotos, la sacudida del suelo puede causar una pérdida de fuerza o rigidez. El proceso que conduce a tal pérdida de fuerza o rigidez se llama licuación del suelo, el cual es un fenómeno asociado principalmente, pero no exclusivamente, a los suelos saturados y sin cohesión [2].

En 1985, México se vio afectado por un fuerte sismo que ocasionó licuación, cuyo efecto en los acueductos no fue previsto, se produjeron daños graves en las líneas principales y secundarias de la red de suministro de agua, causando que más de 5 millones de habitantes quedaran sin acceso al agua [3]; teniendo en cuenta que un sismo trae consigo otras problemáticas, como daños estructurales a viviendas, heridos y muerte, la falta de agua agrava la situación aún más.

En la República de Panamá también se han registrado eventos sísmicos que han causado licuación del suelo. Uno de ellos es el caso del sismo de Limón, ocurrido el 22 de abril de 1991, el cual registró una magnitud de 7.7 Mw [4]. La licuación abarcó aproximadamente 355 km cuadrados en Bocas del Toro, hasta una distancia de 100 km del epicentro [5]. Siendo un total aproximado de 3 000 km cuadrados afectados por licuación entre el territorio de Panamá y Costa Rica. Además de los daños estructurales y a las carreteras, en Costa Rica reportaron daños en la red de distribución de agua potable, con un costo de 23.7 millones de dólares y otros daños menores en la red eléctrica y telefónica [4].

Este estudio forma parte del Proyecto IOMA 19-011 cuyo título es “Vulnerabilidad Sísmica de Redes de Agua Potable en Panamá” y se enfoca en investigar las metodologías actuales para determinar el potencial de licuación enfocado a implementarse como uno de los elementos de una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de tuberías de redes de agua de potable.

En primer lugar, se expone un marco histórico que sirve como referencia para evidenciar las consecuencias de los sismos y que a su vez ayuda a justificar la necesidad de realizar este estudio en áreas potencialmente vulnerables en nuestro país.

Luego se presentan las metodologías para determinar el potencial de licuación que son más aplicables para el estudio. Posteriormente, se utilizarán estas metodologías en un sondeo realizado en la ciudad de David. Y finalmente, se presentarán los resultados obtenidos para las condiciones analizadas en este estudio, lo cual sirve para ejemplificar la metodología general propuesta para utilizar en futuros estudios que se realizarán dentro del marco del Proyecto IOMA 19-011.

2. Metodología

La metodología aplicada para realizar esta investigación esta dividida en dos secciones, la primera consiste en realizar una revisión bibliografía que define un contexto histórico de la importancia del tema a tratar, y un marco teórico en el cual será la base para cumplir con los objetivos de la investigación.

La segunda sección consiste en la obtención de información y estimación de parámetros necesarios para estimar el potencial de licuación. Esto fue posible, recopilando información de sondeos existentes y utilizando las recomendaciones dadas por el Reglamento Estructural Panameño (REP-2014) para estimar los parámetros que no fueron medidos en campo o determinados en laboratorio.

También se elaboró una hoja de cálculo que permite evaluar el potencial de licuación del suelo por los diferentes métodos que resultaron aplicables. Esta base de datos fue evaluada para determinar si las características del suelo eran típicas de un suelo susceptible a licuación y se seleccionó un sondeo para aplicar las metodologías y evaluar el potencial de licuación para sismos de diferentes magnitudes (6.0 M_w , 6.5 M_w , 7.0 M_w , 7.5 M_w y 8.0 M_w)

2.1 Marco Histórico

La importancia del desarrollo de medidas preventivas y de recuperación adecuadas ante este tipo de eventos es necesaria, porque se busca disminuir la pérdida de vidas y de capital económico. Tanto en las medidas ya establecidas como en las que se establecerán a futuro, es necesario el estudio de sismos registrados a lo largo de la historia, sus mecanismos de acción y consecuencias. Como parte de ese propósito, a continuación, se exponen algunos de los terremotos más importantes de los siglos XX y XXI en el mundo y en la República de Panamá.

2.1.1 Gran Terremoto de San Francisco, Estados Unidos, 1903

Se estima que este sismo registró una magnitud de 8.3 en escala de Richter (ML) y entre 7.7 y 7.9 en la escala de magnitud de momento (M_w) [6]. Se detectaron varios tipos de

fallas relacionadas a la licuación del suelo como lo es la propagación lateral y subsidencia. El incendio destruyó 28 000 edificios [6], 4.05 millas cuadradas (10.6 km cuadrados) y se estima que los daños causados por este tuvieron un costo de aproximadamente 500 millones de dólares, tomó la vida de entre 600 y 800 personas, dejando sin hogar a 200 000 personas, de los 460 000 habitantes estimados de la ciudad hasta ese momento [7]. Luego del sismo se identificó la Falla de San Andrés como se conoce en la actualidad.

2.1.2 Terremoto de Niigata, Japón, 1964.

Uno de los casos más conocidos de licuación de arena es el relacionado con el terremoto de Niigata en 1964, en el que se produjeron daños en las estructuras debido a las grandes deformaciones del suelo, las cuales se relacionaron con las condiciones geológicas del suelo y la baja elevación de la ciudad, con respecto al nivel del mar. La magnitud registrada fue de 7.3 M_L en la escala de Richter o 7.6 Mw en escala sismológica de magnitud de momento [2]. Un edificio de apartamentos construido sobre estas arenas se inclinó aproximadamente 80 grados debido a una falla de capacidad de carga en el terreno licuado y ahora es una ilustración frecuentemente usada de los resultados de la licuación [8], véase Figura 1.

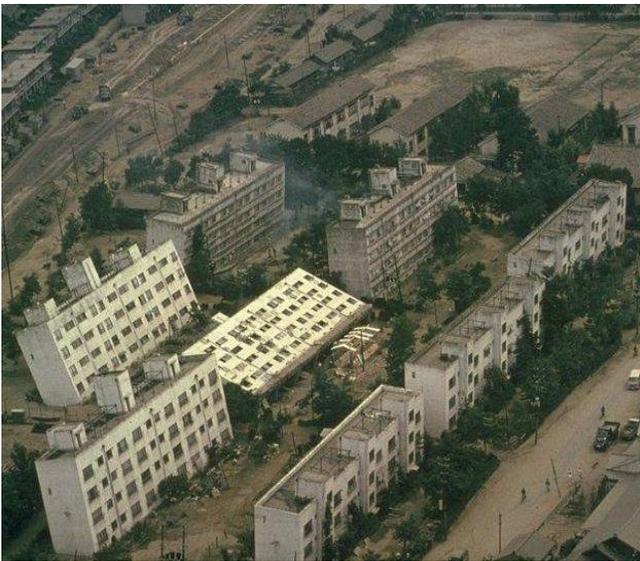


Figura 1. Edificio de apartamentos en Kawagishi-cho afectados por la licuación de los cimientos en el terremoto de Niigata de 1964. Disponible en: <https://buildingfailures.files.wordpress.com/2014/02/tiltedbuilding.jpg>

2.1.3 Gran Terremoto de Alaska, Estados Unidos, 1964.

Terremoto de magnitud 9.2 Mw, ocurrido el 27 de marzo de 1964, siendo el mayor terremoto registrado en la historia de los Estados Unidos y el segundo mayor terremoto registrado

con instrumentos. Se registraron importantes fallas en el suelo, licuación, deslizamientos de tierra y avalanchas masivas y causó importantes daños estructurales en edificios, carreteras, ferrocarriles y autopistas. En varios sitios, se registraron asentamientos en el suelo de alrededor de 1.0 m hasta 2.4 m y se abrieron grietas en el suelo de 1.3 m de profundidad y 3.7 m de ancho [9].

2.1.4 Sismo de México, 1985 y 2017

Sismo de magnitud 8.1 Mw e intensidad de IX en la escala MMI, que sacudió la Ciudad de México el 19 de septiembre de 1985. Una gran parte de los daños registrados fueron las roturas en las tuberías de la red de agua potable de la Ciudad de México, lo cual resultó en que se suspendiera el abastecimiento de este vital líquido a aproximadamente 5 millones de personas. En otras ciudades cercanas al epicentro se registraron daños en la red de distribución de agua potable y el alcantarillado [3].

Aún con el conocimiento de los sucesos ocurridos 32 años antes, hasta ese momento, el 19 de septiembre 2017 la Ciudad de México se enfrentó a un sismo de 7.1 Mw, con epicentro a aproximadamente a 120 km al sureste de la ciudad.

Luego del sismo, aproximadamente 3.3 millones de habitantes quedaron sin el suministro de agua debido al daño registrado en la infraestructura hidráulica, de acuerdo con el Director Nacional del Agua (Conagua), los daños estimados ascienden a 20 millones de dólares [10].

El daño causado por el sismo no solo fue físico, ante la situación de escasez de agua se registraron conflictos, bloqueo de calles y robos a mano armada a los conductores de los camiones cisterna encargados de abastecer de agua a las personas [11].

2.1.5 Terremoto de Chile, 2010.

El 27 de febrero de 2010 se registró un sismo de magnitud 8.8 Mw., en las ciudades más afectadas presentaron intensidades de hasta VIII MMI. Se registraron 524 muertes, más de 2 millones de damnificados, y el costo de los daños alcanzan los 30 000 millones de dólares [12]. Se determinó que luego de los daños ocasionados por el tsunami, la licuación de suelos fue el fenómeno geológico más extendido, causando gran daño a las líneas de vida, haciendo especial mención a la red de distribución de agua potable. Se observó licuación hasta al menos 400 km de distancia al epicentro [12]. Este fenómeno se ha evidenciado en sismos desde el año de 1570 a través de relatos y registros históricos [13].

2.1.6 Grande terremoto de Panamá, Panamá, 1882.

Uno de los mayores sismos registrado en la historia de Panamá ocurrió el 7 de septiembre de 1882, con una magnitud 7.9 M_L en la escala Richter (M_L). La cifra de fallecidos a causa del sismo superó las 100 personas, además de graves daños a

las estructuras del Canal Francés, el ferrocarril de Panamá, la Catedral Metropolitana del Casco Antiguo de la capital y edificios en Colón y Panamá. No se tiene información acerca de si los sistemas de abastecimiento de agua funcionaban correctamente en Panamá o Colón, pero sí de que no se contaba con servicio eléctrico según el informe del Sistema Nacional de Protección Civil en el año 2008.

2.1.7 Terremoto de Panamá de 1934

Este sismo se describe como uno de los más violentos que se ha registrado en la región del Golfo de Chiriquí; el mismo registró una magnitud de 7.6 Ms [14]. Camacho en su investigación realizada en 1991 referencia fuentes bibliográficas que señalan que el sismo fue registrado en la Zona del Canal de Panamá. Este terremoto causó daños económicos que alcanzan la suma de B/. 1 700 000 de la época y en el Poblado de Puerto Armuelles se reportó una intensidad de IX MM. También se registraron daños menores a lo largo de la costa debido un pequeño tsunami, ocasionado por el sismo, que alcanzo una altura de 0.6 m y un oleaje subsecuente con duración de más de cinco horas; [15].

2.1.8 Terremoto de Burica o Puerto Armuelles, Chiriquí, 1979.

Sismo que tuvo lugar el 1 de julio de 1979, con una magnitud de 6.4 Ms. No fueron reportados muertos o heridos, pero sí se presentaron daños en edificios públicos, el colapso de la Escuela Secundaria de Puerto Armuelles y en las estructuras de la Petroterminal, pausando operaciones por una semana para arreglar cuatro tuberías dañadas las cuales se filtraba petróleo dando lugar a la contaminación marina.

2.1.9 Terremoto de Limón, Costa Rica – Panamá, 1991.

Ocurrido el 22 de abril de 1991, el cual registró una magnitud de 7.7 Mw [4]. El sismo causó 79 muertes, 1061 heridos y 24 341 damnificados y alrededor de 375 millones en daños infraestructurales. La licuación abarcó aproximada 355 km cuadrados en Bocas del Toro, hasta una distancia de 100 km del epicentro [5]. Otros daños identificados fueron desplazamientos laterales de sedimentos no consolidados, hundimientos, grietas, volcancitos de arena, entre otros. Además de los daños estructurales y a las carreteras, en Costa Rica reportaron daños en la red de distribución de agua potable, con un costo de 23.7 millones de dólares y otros daños menores en la red eléctrica y telefónica [4].

2.1.10 Terremoto de Puerto Armuelles, Chiriquí, 2003.

Sismo registrado el 25 de diciembre de 2003, su epicentro registrado a 16 km al noreste de la ciudad de Puerto Armuelles y a una profundidad de 22 km. Se dio la pérdida del servicio eléctrico de forma temporal. Se generaron daños en las

instalaciones del segundo piso del Hospital Dionisio Arrocha de Puerto Armuelles, por lo que se decide evacuar a los pacientes de este y del Hospital Regional según el informe del Sistema Nacional de Protección Civil en el año 2008.

Se registran 390 réplicas a partir del sismo y daños en al menos 574 viviendas, siendo 69 colapsos totales y viéndose afectadas 2298 personas. No hubo daños sobre carreteras, sin embargo; el puente que está sobre Río Mar se vio afectado y múltiples tuberías de la red de abastecimiento de agua de 4, 6, 10 y 12 pulgadas se vieron dañadas. En Costa Rica, el puente sobre el río Corredores de Ciudad Nelly sufrió problemas y presentó grietas, unas varias casas en la Finca Naranjo y el Alto El Roble sufrieron daños y se sufrieron los efectos de licuación de suelos según el informe del Sistema Nacional de Protección Civil en el año 2008.

2.2 Marco Teórico

La licuación es un fenómeno que ha sido ampliamente estudiado durante más de 60 años, es por esta razón que existen una gran cantidad de metodologías utilizadas para determinar el potencial de licuación de un suelo; y las más ampliamente utilizadas en la actualidad se basan en pruebas de campo o de laboratorio, donde el objetivo principal es analizar las características y condiciones del suelo y determinar el potencial de licuación mediante la implementación de correlaciones basadas en la data histórica analizada, a continuación expondremos las dos principales metodologías aplicadas en la actualidad, iniciando con los conceptos en los que se fundamentan ambas.

2.2.1 Fundamento

El Método Simplificado consiste en utilizar correlaciones que han sido aplicadas y actualizadas constantemente a través de los años, luego de su formulación en 1970.

2.2.1.1 Esfuerzo cortante inducido por el sismo

El método establece que un elemento de suelo a una profundidad dada, durante un movimiento sísmico se encuentra sometido a un esfuerzo cortante promedio definido por la ecuación 1.

$$\tau_{av} = 0.65 * \gamma h * \frac{a_{max}}{g} * r_d \quad (1)$$

Y se encontró conveniente definir la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR, por sus siglas en inglés, Cyclic Stress Ratio), el cual es inducido por el terremoto dadas las condiciones del sitio como se presenta en la ecuación más adelante, se puede observar que esta ecuación es el resultado de normalizar la ecuación 1 dividiéndola entre el esfuerzo efectivo inicial de tal manera que ahora, se toma en cuenta la profundidad del nivel freático en la ecuación 2.

$$CSR = 0.65 * \frac{\gamma h}{\sigma'_0} * \frac{a_{max}}{g} * r_d \quad (2)$$

Donde:

γ = peso unitario del suelo

h = profundidad

g = aceleración de la gravedad

a_{max} = aceleración máxima del suelo

r_d = coeficiente de reducción de esfuerzos

2.2.1.2 Esfuerzo cortante necesario para causar licuación

Para determinar el esfuerzo cortante que causa licuación en un suelo, originalmente se debían realizar pruebas triaxiales cíclicas de compresión en las muestras de suelos dado un número de ciclos de cargas esperadas para un sismo. Este parámetro es actualmente conocido como Relación de Resistencia Cíclica (CRR, por sus siglas en inglés, Cyclic Resistance Ratio) y ha podido ser estimado utilizando una serie de datos obtenidos en diferentes sitios donde se presentó licuación o no, se plantearon correlaciones basadas en el número de golpes SPT corregidos, según la ecuación 3.

$$(N_1)_{60} = N_{SPT} * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S \quad (3)$$

Donde: $(N_1)_{60}$ = Número de golpes corregido a una energía de 60 % y normalizado a una presión de confinamiento efectiva de 1 atm, (aproximadamente $1 \text{ ton/ft}^2 \approx 1 \text{ kg/cm}^2$)

C_N = Coeficiente de corrección de confinamiento

N_{SPT} = Número de Golpes obtenido de la prueba SPT

C_E = Coeficiente de corrección de energía

C_B = Coeficiente de corrección de diámetro de pozo

C_R = Coeficiente de corrección de longitud de tubería

C_S = Coeficiente de corrección de muestras con o sin alineador (liner)

Los valores para los coeficientes C_E , C_B , C_R y C_S se muestran en la Tabla 1. El coeficiente C_N se estima a través de ecuaciones que veremos más adelante.

Cada método utiliza sus propias ecuaciones para estimar el parámetro CRR, debido a que se realizan correcciones adicionales, para obtener el parámetro $CRR_{7.5}$. Este último, llamado curva base de arenas limpias, el cual es un ajuste utilizado debido a que el método fue desarrollado principalmente para suelos arenosos y para terremotos con de magnitud 7.5. Lo anteriormente expuesto se expresa a través de la ecuación 4.

$$CRR = CRR_{7.5} * MSF \quad (4)$$

Donde

MSF = Factores de Escala de Magnitud (MSF, por sus siglas en inglés, Magnitud Scalling Factors), los cuales serán presentados más adelante.

2.2.1.3 Potencial de Licuación de Suelos

Cada método emplea diversas formulaciones para obtener los parámetros presentados previamente: Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR), Relación de Resistencia Cíclica (CRR), Factores de Escala de Magnitud (MSF). Sin embargo, el objetivo es el mismo, determinar el potencial de licuación del suelo y esto se logra evaluando el Factor de Seguridad contra Licuación, según la ecuación 5.

$$FS = \left(\frac{CRR_{7.5}}{CSR} \right) * MSF \quad (5)$$

Tabla 1. Correcciones del SPT (Modificado de Skempton 1986) según Robertson y Wride (1998)

Factor	Variable de Equipo	Término	Corrección
Relación de energía	Martillo de dona	"C" _ "E"	0.5 - 1.0
	Martillo de seguridad	"C" _ "E"	0.7 - 1.2
	Martillo tipo dona de punta automática	"C" _ "E"	0.8 - 1.3
Diámetro de pozo	65 – 115 mm	"C" _ "B"	1
	150 mm	"C" _ "B"	1.05
	200 mm	"C" _ "B"	1.15
Longitud de tubería	< 3 m	"C" _ "R"	0.75
	3 – 4 m	"C" _ "R"	0.80
	4 – 6 m	"C" _ "R"	0.85
	6 – 10 m	"C" _ "R"	0.95
	10 – 30 m	"C" _ "R"	1.0
Método de Muestreo	Muestreador Estándar	"C" _ "S"	1.0
	Muestreados sin revestimiento	"C" _ "S"	1.1 – 1.3

Fuente: T. L. Youd et al., (1997).

Usualmente un FS menor que 1.0 es considerado licuable, sin embargo, debido a la naturaleza teórica de estos enfoques, se ha encontrado evidencia de licuación en sitios cuyo FS fue mayor que 1.0. De manera similar, un valor de FS menor a 1.0 no siempre significa que el suelo se licuará, debido a que hay otros factores que influyen en la ocurrencia de este fenómeno, como la magnitud del sismo, la distancia al epicentro, la profundidad del nivel freático, y otros [16]. Al utilizar el método simplificado la tasa de éxito en la predicción de casos de licuación es de 93 %, mientras que para los casos de no licuación la tasa de éxito es de 88 % [17].

2.2.2 Método Youd & Idriss

Este método ha sido ampliamente revisado y mejorado a través de los años gracias a contribuciones de diversos autores, siendo una de las actualizaciones más importantes la realizada en el durante los talleres de 1996 y 1998 por el Centro Nacional de Investigación de Ingeniería Sísmica (NCEER, por sus siglas en inglés, National Center for Earthquake Engineering Research).

2.2.2.1 Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Si recordamos en la ecuación 1 se introdujo el coeficiente de reducción de esfuerzos (r_d), el cual es utilizado para tomar en cuenta que el suelo es un cuerpo deformable, y es recomendable utilizarlo hasta profundidades máximas de 40 ft donde el método ha sido validado. Se puede estimar el valor promedio utilizando las relaciones definidas por la ecuación (6), las cuales fueron propuestas por Liao y Whitman, Robertson y Wride y William F. Marcursion. También se puede utilizar la ecuación (7), planteada por Thomas F. Blake, la cual es una alternativa recomendada para ser aplicada en hojas de cálculo.

$$r_d = \begin{cases} 1.0 - 0.00765z & \text{para } z \leq 9.15\text{m} \\ 1.174 - 0.0267z & \text{para } 9.15\text{m} < z \leq 23\text{m} \\ 0.744 - 0.008z & \text{para } 23 < z \leq 30\text{m} \\ 0.5 & \text{para } z > 30\text{m} \end{cases} \quad (6)$$

$$r_d = \frac{1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2} \quad (7)$$

2.2.2.2 Relación de Resistencia Cíclica (CRR)

Para efectos de la práctica ingenieril, se puede determinar el coeficiente de corrección de confinamiento utilizando la ecuación 8 propuesta por Liao y Whitman (1985) o la ecuación 9 propuesta por Kayen et al (1992).

$$C_N = (Pa/\sigma'_0)^{0.5} < 1.7 \quad (8)$$

$$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma'_0}{Pa}} < 1.7 \quad (9)$$

También se aplican correcciones para el contenido de finos y plasticidad del suelo, esto se determina a través del uso de la ecuación 10, 11 y 12.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (10)$$

Donde α y β son coeficientes determinados a través relaciones que se muestran en las ecuaciones 11 y 12:

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{para } FC \leq 5\% \\ \exp\left(1.76 - \frac{190}{FC^2}\right) & \text{para } 5\% < FC < 35\% \\ 5.0 & \text{para } FC \geq 35\% \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & \text{para } FC \leq 5\% \\ 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} & \text{para } 5\% < FC < 35\% \\ 1.2 & \text{para } FC \geq 35\% \end{cases} \quad (11)$$

Donde FC = Contenido de Finos.

Utilizando las correlaciones anteriores se determina el parámetro $CRR_{7.5}$, el cual es la relación de resistencia cíclica para terremotos de magnitud de 7.5 y $(N_1)_{60cs}$.

Diferentes aproximaciones a la curva base simplificada han sido planteadas, A. F. Rauch desarrolló la ecuación 13 y Thomas F Blake, la ecuación 14 ambas ecuaciones son válidas para $(N_1)_{60cs}$ menores a 30.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 * (N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (12)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{a + cx + ex^2 + gx^3}{1 + bx + dx^2 + fx^3 + hx^4} \quad (13)$$

Donde $x = (N_1)_{60cs}$, $a = 0.048$; $b = -0.1248$; $c = -0.004721$; $d = 0.009578$; $e = 0.0006136$; $f = -0.0003285$; $g = -1.673 \times 10^{-5}$ y $h = 3.714 \times 10^{-6}$.

2.2.2.3 Factores de Escala de Magnitud (MSF)

Para magnitudes menores a 7.5, el límite inferior recomendado son los MSF propuestos por Idriss, ecuación 15 y el límite superior recomendado son los MSF propuestos por Andrus y Stokoe, ecuación 16.

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (15)$$

$$MSF = \left(\frac{M_w}{7.5}\right)^{-3.3} \quad (16)$$

Para magnitudes mayores a 7.5 se recomiendan los MSF propuestos por Idriss, ecuación 15, debido a que estos son más conservadores que los MSF propuestos originalmente y no se cuenta con suficiente data de campo para recomendar los MSF de otros autores.

2.2.2.4 Otras consideraciones

Resultados de laboratorios demostraron que la relación entre el esfuerzo de confinamiento la relación de esfuerzo cíclico (CSR) es una función no-lineal que aumenta con el incremento en el esfuerzo normal. Los factores recomendados para la práctica ingenieril se muestran en la Figura 2, los cuales pueden ser utilizaos para arenas limpias, arenas limosas y gravas.

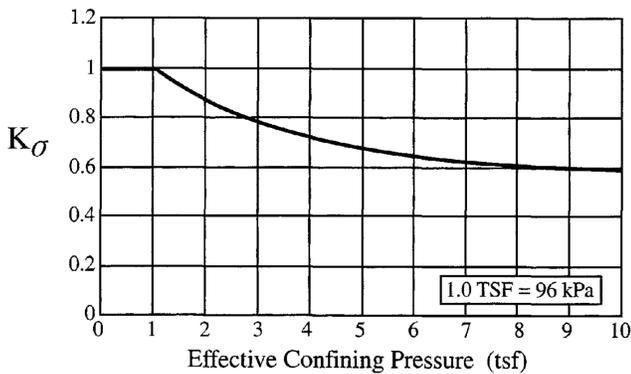


Figura 2. Valores mínimos de Kσ recomendados para arenas limpias, limosas y gravas. Fuente: T. L. Youd et al., (1997).

2.2.3 Método Idriss & Boulanger

En 2004, Idriss y Boulanger propusieron una actualización a los procedimientos semi-empíricos utilizados para evaluar el potencial de licuación.

2.2.3.1 Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR)

Idriss, en 1999, luego de realizar análisis de respuesta de sitios, concluyó que el factor de reducción de esfuerzo, para la mayoría de las condiciones prácticas, podría expresarse en términos de la profundidad y la magnitud del terremoto; proponiendo la ecuación 17 y la ecuación 18.

$$\ln(r_d) = \alpha(z) + \beta(z) * M_w \quad \text{para } z \leq 34 \text{ m} \quad (17)$$

$$r_d = 0.12 \exp(0.22 M_w) \quad \text{para } z > 34 \text{ m} \quad (18)$$

Donde α(z) y β(z) están dados por las relaciones expresadas en la ecuación (19) y ecuación (20).

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 * \text{sen} \left(\frac{z}{11.73} + 5.133 \right) \quad (19)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 * \text{sen} \left(\frac{z}{11.28} + 5.142 \right) \quad (20)$$

z en metros y Mw es la Magnitud de Momento del terremoto

2.2.3.2 Relación de Resistencia Cíclica (CRR)

Basándose en relaciones teóricas e información experimental de CPT y SPT, Boulanger (2003) reevaluó el factor CN, lo que le permitió en 2004, junto a Idriss, desarrollar las relaciones expresadas por la ecuación 21 y la ecuación 22 empleadas para el SPT

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma_0} \right)^\alpha \leq 1.7 \quad (21)$$

Donde el exponente α se puede expresar en términos de (N1)60cs de acuerdo con la ecuación 22.

$$\alpha = 0.784 - 0.0768 \sqrt{(N_1)_{60cs}} \quad (22)$$

El factor (N1)60cs se encuentra limitado a un valor de 46 para ser utilizado en estas expresiones. También es importante mencionar que para resolver estas ecuaciones es necesario realizar un proceso iterativo.

Se propuso la ecuación 23 para calcular la resistencia a la penetración estándar equivalente de arenas limpias para arenas limosas.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (23)$$

Donde la variación de Δ(N1)60 esta en función de FC de acuerdo con la ecuación (24).

$$\Delta(N_1)_{60} = \exp \left(1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left(\frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right) \quad (24)$$

Finalmente, el valor de CRR para un terremoto de magnitud 7.5 basado en (N1)60cs es calculado utilizando la ecuación (25).

$$CRR_{7.5} = \exp \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4} \right]^4 - 2.8 \right) \quad (25)$$

2.2.3.3 Factores de Escala de Magnitud (MSF)

Las derivaciones para obtener los factores de escala de magnitud fueron elaboradas combinando correlaciones entre el número de ciclos de esfuerzos equivalentes uniformes versus la magnitud de los terremotos y relaciones entre la relación de esfuerzo cíclico (CSR) y el número de ciclos de esfuerzos equivalentes uniformes. Los resultados de la reevaluación hecha por Idriss (1999), dieron como resultado la ecuación 26.

$$MSF = 6.9 \exp \left(-\frac{M}{4} \right) - 0.058 \leq 1.8 \quad (26)$$

2.2.3.4 Otras consideraciones

Idriss & Boulanger, (2004) introdujeron un nuevo parámetro que utilizaron para relacionar los efectos de la densidad relativa y el esfuerzo efectivo en la Relación de Resistencia Cíclica, lo cual le permitió proponer la ecuación 27.

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln \left(\frac{\sigma'_0}{p_a} \right) \leq 1.1 \quad (27)$$

Donde 1.1 es el valor límite de K_{σ} para un esfuerzo efectivo de aproximadamente 40kPa y el parámetro C_{σ} es calculado según la ecuación 28.

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 17.3 D_R} \leq 0.3 \quad (28)$$

También se reevaluaron las correlaciones entre $(N_1)_{60}$ y D_R para arenas limpias, obteniendo la relación definida por la ecuación (29).

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{46}} \quad (29)$$

De esta manera, reemplazando la ecuación 29(29) en la ecuación 28 se obtiene la ecuación 30, donde se limita el valor de $(N_1)_{60}$ a un valor de 37, para cumplir con el límite impuesto al parámetro C_{σ} .

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18.9 - 2.55 \sqrt{(N_1)_{60}}} \leq 0.3 \quad (30)$$

2.2.4 Índice de Potencial de Licuación (LPI)

A partir de los resultados obtenidos del método simplificado, cuyo origen se remonta a Seed y Idriss, (1970), Iwasaki et al., (1981) proponen una metodología simplificada para evaluar el potencial de licuación de suelos arenosos saturados.

Como hemos visto previamente, FS indica el potencial de licuación de un estrato a una profundidad determinada, sin embargo, LPI determina el potencial de licuación de una columna de suelo, lo cual permite visualizar más fácilmente la ocurrencia de dicho fenómeno. El Índice de Potencial de Licuación resulta más representativo de las condiciones reales en campo, donde diferentes estratos pueden experimentar licuación dependiendo de las condiciones del terremoto.

En primer lugar, Iwasaki define el factor de resistencia a licuación F_L determinado por la ecuación 31.

$$F_L = \frac{R}{L} \quad (31)$$

Donde L es la relación de esfuerzo cíclico (CSR) inducido por el terremoto, determinada como se ha planteado anteriormente, basándose en la ecuación 2 inicialmente

propuesta por Seed y Idriss, con la modificación del factor r_d de acuerdo con la ecuación 32, donde z es la profundidad (en metros).

$$r_d = 1.0 - 0.015z \quad (32)$$

R es la resistencia in situ del elemento a las cargas dinámicas, lo cual anteriormente se conoció con CRR y puede ser evaluado basado en los resultados de pruebas de corte cíclicas, de acuerdo con las relaciones expresadas por la ecuación 33 y ecuación 34.

Para $0.04 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.6 \text{ mm}$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_o + 0.7}} + 0.225 \log_{10} \left(\frac{0.35}{D_{50}} \right) \quad (33)$$

Para $0.6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 1.5 \text{ mm}$

$$R = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_o + 0.7}} - 0.05 \quad (34)$$

Donde N es el número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT), σ'_o es el esfuerzo de confinamiento efectivo (en kgf/cm²) y D_{50} es el diámetro efectivo medio de las partículas (en mm).

Lo anteriormente mencionado, es entonces utilizado para evaluar el Índice del Potencial de Licuación LPI, véase ecuación 35; cuyo objetivo es medir o estimar la severidad del grado de licuación en un lugar determinado; ya que se había observado que este factor influía en el nivel de daño registrado en las estructuras.

$$LPI = \int_0^{20 \text{ m}} F * W(z) * dz \quad (35)$$

Donde la función F, es determinada a través de la ecuación 36(36), y W(z) con la ecuación 37.

$$F = \begin{cases} 1 - F_L & \text{si } F_L \leq 1.0 \\ 0 & \text{si } F_L > 1.0 \end{cases} \quad (36)$$

$$W(z) = \begin{cases} 10 - 0.5z & \text{si } z \leq 20 \\ 0 & \text{si } z > 20 \end{cases} \quad (37)$$

Los valores de LPI varían desde 0 para un F_L mayor de 1.0 en los 20 m de profundidad, hasta un máximo de 100 para un F_L de 0 en los 20 m de profundidad.

La ecuación 35 puede ser expresada en forma discretizada como se muestra a continuación en la ecuación 38.

$$LPI = \sum_{i=1}^n F_i * W_i(z) * H_i \quad (38)$$

Donde F_i esta en función del F_L de la capa i y se calcula siguiendo lo establecido en la ecuación 36. $W_i(z)$ es calculado de acuerdo con la ecuación 37 evaluando z en el centro de la capa i . H_i es el espesor de la capa i y n es el número total de capas analizadas en los primeros 20 m de profundidad.

El modelo fue calibrado y se propusieron los rangos de clasificación mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Rangos del potencial de licuación, según Iwasaki et al., (1981)

Índice de potencial de licuación, LPI	Potencial de Licuación
0	Muy bajo
$0 < LPI \leq 5$	Bajo
$5 < LPI \leq 15$	Alto
$LPI > 15$	Muy Alto

Fuente: Iwasaki et al., (1981).

Papathanassiou, (2008) analizó el impactó de aplicar una modificación al Método Iwasaki utilizando el Método Youd et al., para el cálculo de la Relación de Resistencia Cíclica (CRR). Papathanassiou menciona las siguientes ecuaciones correspondiente al método Youd et al., utilizadas en su estudio:

- ecuación 8 propuesta por Liao y Whitman para obtener el factor de corrección por sobrecarga utilizado para obtener el valor corregido de N_{spt}
- ecuación 6 para el cálculo del coeficiente de reducción de esfuerzo r_d
- ecuación 16 para el cálculo del factor de escala de magnitud (MSF)

Este estudio, le permitió a Papathanassiou realizar un análisis y clasificar los resultados en 3 grupos dependiendo de la severidad de las manifestaciones de licuación observadas en los lugares estudiado, ver Tabla 3.

Un dato relevante de mencionar es que la data implementada por Papathanassiou consiste en 79 perforaciones SPT en sitios ubicados en Taiwán, Turquía y Grecia, mientras que los sitios investigados por Iwasaki estaban ubicados en Japón. Por lo tanto, es posible que este cambio en las condiciones geológicas debido a la ubicación sea uno de los factores que generen la diferencia en los resultados de LPI obtenidos y por lo tanto, es recomendable realizar más estudios para investigar su efecto en el cálculo de LPI Papathanassiou, (2008).

Tabla 3. Rangos del potencial de licuación, según Papathanassiou, (2008)

Índice de potencial de licuación, LPI	Potencial de Licuación
$LPI \leq 19$	Bajo
$19 < LPI \leq 32$	Medio
$LPI \geq 32$	Alto

Fuente: Papathanassiou, (2008).

3. Resultados y discusión

Al analizar la información recopilada se puede observar que la mayoría de las columnas de suelo están formadas de materiales limosos y arcillosos y todas las muestras de suelo presentan contenido de finos superior al 30 %. De las 10 columnas de suelo, solo 3 presentan una estructura en la que el material granular se encuentra en la superficie. A continuación, se presentan los datos más relevantes encontrados al analizar estas 3 columnas de suelo:

Sondeo A: Presenta contenido granular hasta una profundidad de 11.50 metros y luego presenta una arcilla de alta plasticidad hasta una profundidad 13.72 metros en donde se encontró el material meteorizado. Sabiendo que los métodos a emplear son aplicables hasta una profundidad aproximada de 12 metros, esta columna de suelo es una buena opción para estudiar debido a que puede ser evaluada hasta la profundidad máxima de 11.50 metros. También es importante mencionar que el nivel freático reportado fue de 9.10 metros de la superficie.

Sondeo B: Presenta contenido granular hasta una profundidad 6.5 metros, luego presenta arcilla y limo hasta una profundidad de 11.50 metros, para luego dar inicio al material meteorizado. El nivel freático se encontró a 6.0 metros de la superficie.

Sondeo C: Presenta contenido granular hasta una profundidad 7.0 metros, luego presenta arcilla hasta una profundidad de 8.85 metros, para luego dar inicio al material meteorizado. El nivel freático para este sondeo no se reportó.

De los tres sondeos presentados anteriormente, el Sondeo A, mostrado en la Figura 3, se ha seleccionado para ser evaluado, debido a que es el sondeo más completo de las tres opciones. Recordando que las metodologías a implementar son válidas hasta 40 pies (aproximadamente los 12 metros de profundidad), se puede observar que este sondeo posee material de contenido granular en este mismo rango, hasta una profundidad de 11.50 metros, sin embargo, es importante notar que el nivel freático no se encuentra muy cerca de la superficie.



Figura 3. Estratigrafía del Sondeo A.

En la Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestra gráficamente los resultados obtenidos en el cálculo del Factor de Seguridad para el Método Youd e Idriss, Método Idriss y Boulanger y Método Papathanassiou e Iwasaki sismos de magnitud $M_w = 6.0$, $M_w = 6.5$, $M_w = 7.0$, $M_w = 7.5$ y $M_w = 8.0$, respectivamente.

También, en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo del Índice de Potencial de Licuación utilizando el Método de Iwasaki y Método Papathanassiou - Iwasaki.

Tabla 4. Resumen de resultados en el Cálculo del Índice de Potencial de Licuación

Método	Papathanassiou – Iwasaki					Iwasaki
	Mw 6.0	Mw 6.5	Mw 7.0	Mw 7.5	Mw 8.0	
Mw	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	-
LPI	7.59	17.57	27.84	39.26	48.82	51.14
	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto	Muy Alto

4. Conclusiones

La presente investigación se realizó buscando evaluar diferentes métodos para estimar el potencial de licuación del suelo como parte del Proyecto IOMA 19-011 cuyo título es “Vulnerabilidad Sísmica de Redes de Agua Potable en Panamá”.

En el estudio, se aplicaron y analizaron diversas metodologías para estimar el potencial de licuación a través de la creación de una hoja de cálculo que permite analizar una columna estratigráfica. De igual manera, también se realizó una revisión bibliográfica de diversas metodologías para evaluar la vulnerabilidad sísmica de tuberías de agua potable.

Una vez finalizada esta investigación es posible enunciar las siguientes conclusiones:

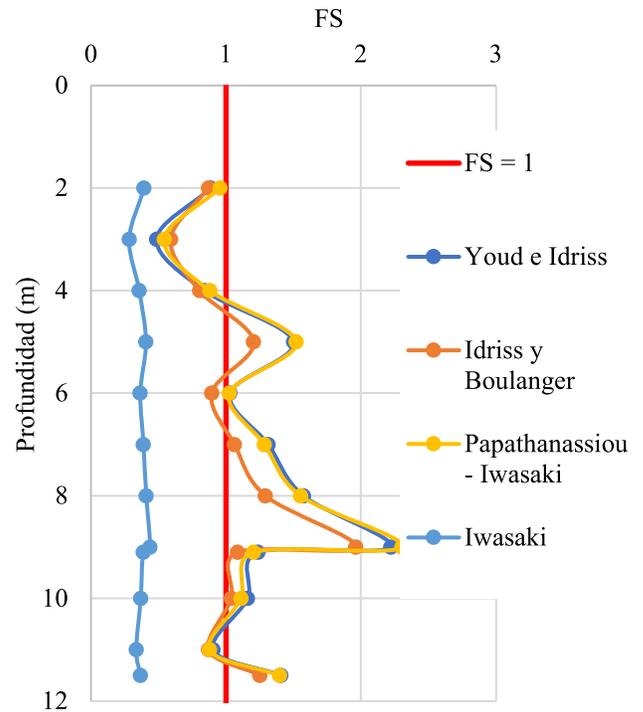


Figura 4. Resultados del Factor de Seguridad para $M_w = 6.0$.

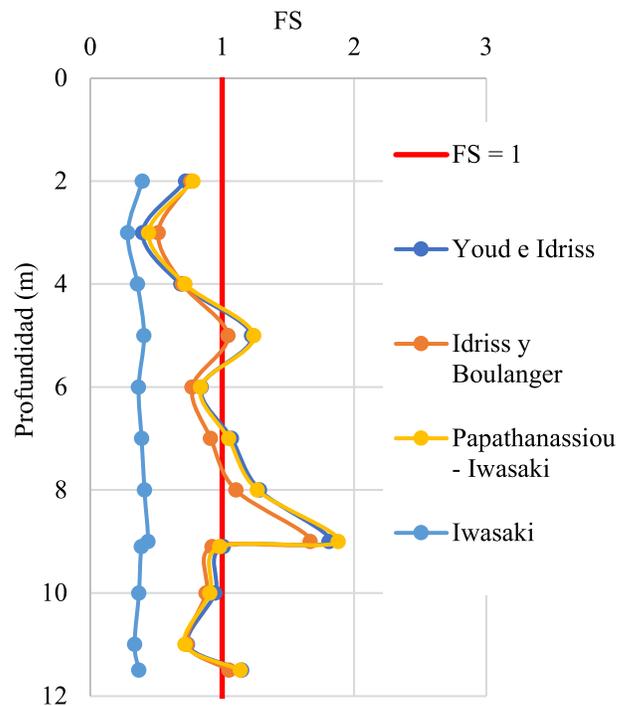


Figura 5. Resultados del Factor de Seguridad para $M_w = 6.5$.

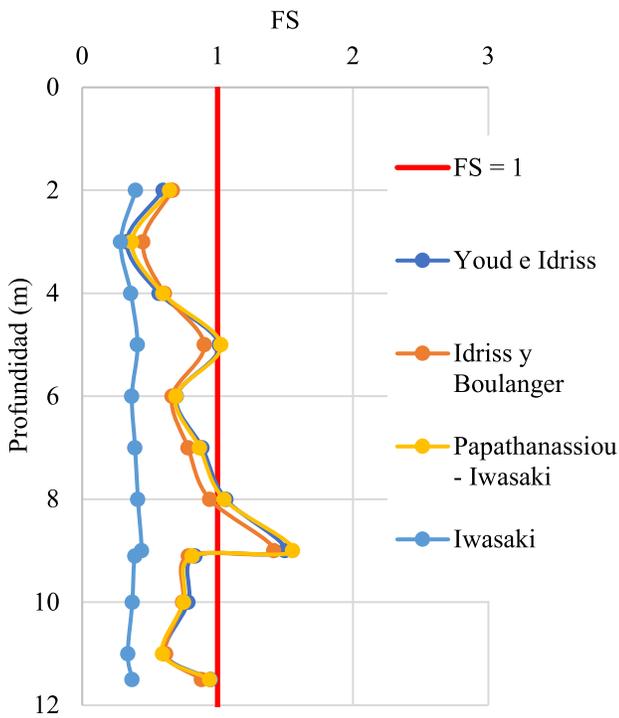


Figura 6. Resultados del Factor de Seguridad para Mw = 7.0

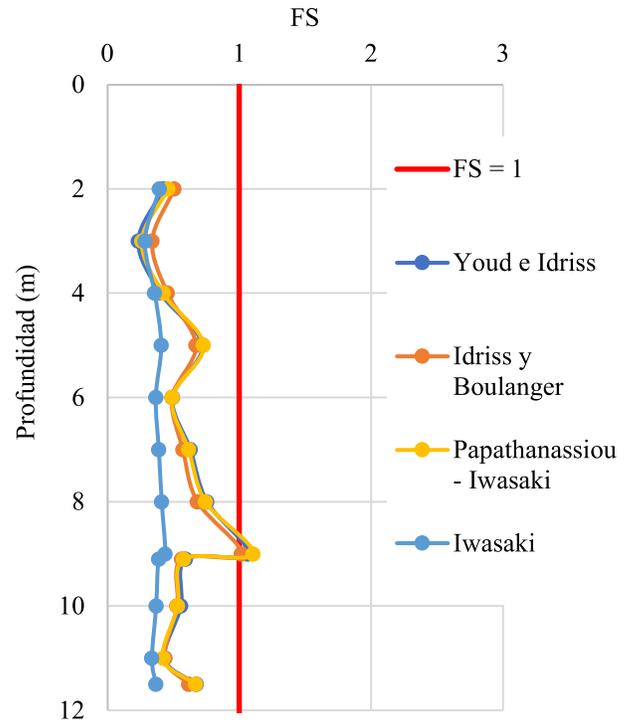


Figura 8. Resultados del Factor de Seguridad para Mw = 8.0

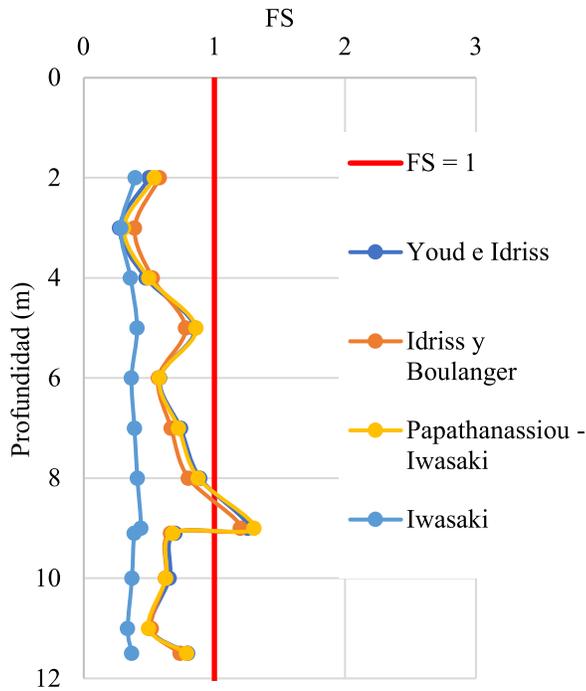


Figura 7. Resultados del Factor de Seguridad para Mw = 7.5

- Los sismos son un fenómeno a través de la historia han demostrado su poder, por lo cual el estudio de sus consecuencias es necesario para asegurar estar lo más preparados posible ante la amenaza que representan los mismos.
- Los métodos aquí evaluados representan una manera sencilla y eficaz para estimar el potencial de licuación basadas en el Ensayo SPT, la cual es una prueba comúnmente realizada en nuestro país, por lo cual, será posible aplicar estos métodos siempre y cuando se cuente con la caracterización adecuada de los estratos de suelo.
- Los resultados obtenidos de los métodos Youd e Idriss, Idriss y Boulanger y Papathanassiou-Iwasaki son comparables, y se puede observar que los resultados son bastantes similares para cada uno de los estratos.
- Los resultados obtenidos indican que para sismos de Mw = 6.0 y Mw = 6.5 con una aceleración máxima de 0.4 g, el Índice de Potencial de Licuación es Bajo. Mientras que para sismos de Mw = 7.0 con aceleración máxima de 0.4g, el Índice de Potencial de Licuación es Medio. Por último, para sismo de Mw = 7.5 y Mw = 8.0 con aceleración máxima de 0.4 g, el Índice de Potencial de Licuación es Alto.
- Los resultados obtenidos indican de dadas las condiciones de estudio, si existe un potencial de licuación, para el

sondeo analizado. Sin embargo, debido a que la mayoría de los sondeos de la base de datos elaborada no contaban con las condiciones necesarias para realizar el análisis y tomando en cuenta que algunos datos fueron estimados, no se puede asegurar que la Ciudad de David presenta un riesgo de Licuación.

- Se recomienda analizar otros fenómenos que pueden surgir como consecuencia de sismos; se recomienda dar prioridad al fenómeno llamado “Movilidad Cíclica”, el cual es similar a la “Licuación”. La principal diferencia radica en que la Licuación es característica principalmente de suelo granulares saturados, y la Movilidad Cíclica es característica de suelos arcillosos.
- Se recomienda establecer una metodología para caracterizar la Ciudad de David, realizando sondeos y análisis más detallados para determinar las aceleraciones máximas que se pueden experimentar para sismos de magnitudes determinadas tal que sea posible generar mapas donde se pueda observar el Factor de Seguridad contra Licuación para diferentes profundidades y los Índices de Potencial de Licuación del área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es resultado del Proyecto IOMA 19-011, el cual fue financiado por SENACYT. Adicionalmente la estudiante fue beneficiada con Convocatoria de Movilidad Internacional Saliente UTP-SENACYT 2021.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Organización Panamericana de la Salud and Organización Mundial de la Salud, “El Agua en Situaciones de Emergencia.” 2009, [Online]. Available: http://www1.paho.org/Spanish/HEP/HES/WtrEmrgS.pdf?ua=1%0Ahttp://www.paho.org/col/index.php?option=com_content&view=article&id=1297:dia-mundial-del-lavado-de-manos-las-manos-limpias-salvan-vidas&catid=388&Itemid=460.
- [2] M. Jefferies and K. Been, *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*, Taylor & F. London, U.K., 2006.
- [3] J. R. Flores Berrones, “Efectos sísmicos en tuberías subterráneas para agua potable en México,” *Ing. hidráulica en México*, pp. 32–39, 1986.
- [4] W. Montero, M. Pardo, L. Ponce, W. Rojas, and M. Fernández, “Evento principal y réplicas importantes del terremoto de Limón,” *Rev. Geológica América Cent.*, vol. espec, pp. 93–102, 1994.
- [5] E. Camacho and V. Viquez, “Licuación y Hundimientos Costeros en el Noroeste de Panamá Durante el Terremoto de Limon,” *Rev. Geológica América Cent.*, vol. esp., pp. 133–138, 1994.
- [6] M. Lou Zoback, “The 1906 earthquake and a century of progress in understanding earthquakes and their hazards,” *GSA Today*, vol. 16, no. 4–5, pp. 4–11, 2006, doi: 10.1130/GSAT01604.1.
- [7] G. K. Gilbert, R. L. Humphrey, J. S. Sewell, and F. Soulé, “The San Francisco Earthquake and Fire of April 18, 1906 and Their Effects on Structures and Structural Materials,” 1907. doi: 10.2307/197388.
- [8] H. Kawasumi, “General Report on the Niigata Earthquake of 1964,” 1968. [Online]. Available: <http://ftp.iris.edu/seismo-archives/quakes/1964niigata/Kawasumi1968.pdf>.
- [9] S. F. Bartlett, “Liquefaction-induced ground failure and bridge damage to the Alaskan Railroad and highway in South Central Alaska during the 1964 Alaskan Earthquake,” *NCEE 2014 - 10th U.S. Natl. Conf. Earthq. Eng. Front. Earthq. Eng.*, 2014, doi: 10.4231/D3154DP9Z.
- [10] I. Zamarrón, “Sismo dejó mayor crisis de agua después de 1985,” *Publímetro*, Oct. 05, 2017.
- [11] E. Baltazar, “La batalla por el agua tras el terremoto: medio millón de mexicanos se quedaron sin el servicio,” *Infobae*, Ciudad de México, 2017.
- [12] M. F. Falcón and P. Ramírez, “Generación De Mapas De Licuación,” 2010.
- [13] J. González and R. Verdugo, “Sitios afectados por licuación a causa del terremoto 27-F,” *VIII Congr. Chil. Ing. Geotécnica*, no. 1, 2014.
- [14] E. Camacho, “The Puerto Armuelles Earthquake (Southwestern Panama) of July 18, 1934,” *Rev. Geológica América Cent.*, vol. 13, pp. 1–13, 1991, doi: 10.14421/musawa.2009.82.201-221.
- [15] V. Viquez and E. Toral, “Sismicidad histórica sentida en el istmo de Panamá,” *Rev. Geofísica*, vol. 27, pp. 135–165, 1987.
- [16] T. Iwasaki, K. Tokida, and F. Tatsuoka, “Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure,” *First Int. Conf. Recent Adv. Geotech. Earthq. Eng. Soil Dyn.*, pp. 209–214, 1981.
- [17] C. H. Juang, H. Yuan, D. H. Lee, and P. S. Lin, “Simplified cone penetration test-based method for evaluating liquefaction resistance of soils,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 129, no. 1, pp. 66–80, 2003.
- [18] T. L. Youd *et al.*, “Proceeding of the NCSEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,” 1997.
- [19] I. M. Idriss and R. W. Boulanger, “Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes,” *11th Int. Conf. Soil Dyn. Earthq. Eng.*, pp. 32–56, 2004.
- [20] H. B. Seed and I. M. Idriss, “A Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential,” 1970.
- [21] G. Papathanassiou, “LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence,” *Eng. Geol.*, vol. 96, no. 1–2, pp. 94–104, 2008, doi: 10.1016/j.enggeo.2007.10.005.