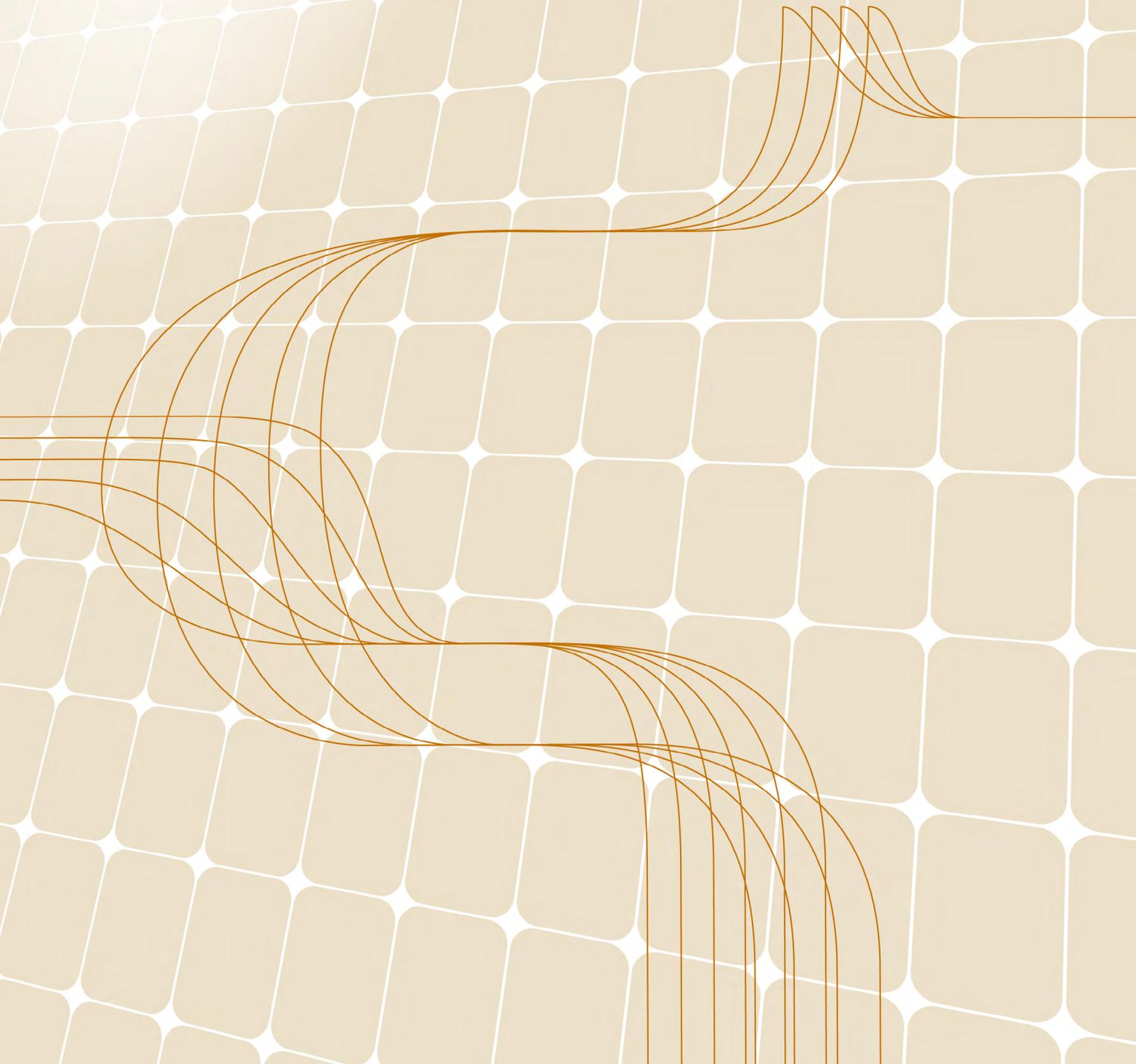


<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2023 - VOLUMEN 33 (2)



Análisis de potenciales manifestaciones superficiales de licuación para la zona de Jacó, Costa Rica

Analysis of potential surficial manifestations of liquefaction for the area of Jacó, Costa Rica

Diego Alberto Cordero-Carballo

CMG Caracterización y Modelación Geotécnica S.A., San José, Costa Rica

e-mail: diegocordero@cmg.cr

ORCID: 0000-0003-3727-8228

Gonzalo Montalva-Alvarado

Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

e-mail: gmontalva@udec.cl

ORCID: 0000-0001-8598-7120

Recibido: 8 de agosto 2022

Aceptado: 14 de febrero 2023

Resumen

Se evaluaron potenciales manifestaciones superficiales de licuación por medio de índices de severidad a escala regional para la zona de Jacó, utilizando información generada por quince sondeos CPTu, estimando la demanda sísmica de manera determinista para veinticuatro escenarios, para aceleraciones esperadas a partir de ecuaciones de predicción del movimiento del suelo para América Central, considerando sismos corticales y por subducción, tanto intraplaca como interplaca. Los resultados permiten identificar tres zonas donde se esperarían diferentes niveles de daño según la amenaza sísmica representada en los análisis por medio de la magnitud de un sismo y las aceleraciones que este podría producir, y priorizar así aquellas a investigar con mayor detalle para el desarrollo de proyectos privados, de infraestructura pública y la ubicación de edificaciones primordiales. La utilidad de los resultados se basa en orientar a autoridades municipales y de emergencia a anticipar la respuesta ante la ocurrencia de un escenario de análisis u otro con condiciones intermedias, en conocer anticipadamente la distribución de los sitios donde el daño podría ser mayor para orientar los esfuerzos en cuanto a respuesta inmediata y recuperación. Se espera que los resultados de este proyecto, si bien preliminares, sirvan como insumo para la gestión del riesgo asociado a licuación por medio de medidas ingenieriles y de otra naturaleza para efectos de ordenamiento territorial y para el desarrollo de políticas públicas para el distrito de Jacó, como podría ser un plan regulador.

Palabras Clave:

CPT, índices de severidad, Jacó, licuación, manifestaciones superficiales.



Abstract

Possible surface manifestations of liquefaction were evaluated by means of severity indices at a regional scale for the Jacó area, using information generated by fifteen CPTu, estimating the seismic demand in a deterministic manner for twenty-four scenarios, for expected accelerations from ground motion prediction equations for Central America, considering crustal and subduction earthquakes, both intraplate and interplate. The results allow the identification of three areas where different levels of damage would be expected, depending on the seismic hazard represented in the analyzes by means of the magnitude of an earthquake and the accelerations that it could produce, and prioritize those to be investigated in greater detail for the development of private projects, public infrastructure, and the location of essential buildings. The usefulness of the results is based on guiding municipal and emergency authorities to anticipate the response to the occurrence of an analysis scenario or another with intermediate conditions, knowing in advance the distribution of the sites where the damage could be greater in order to guide the immediate response and recovery efforts. It is expected that the results of this project, although preliminary, will serve as an input for the management of the risk associated with liquefaction through engineering and other measures, for purposes of land use planning and for the development of public policies for the district of Jacó, as could be a regulatory plan.

Keywords:

CPT, Jacó, liquefaction, severity indices, surficial manifestations.

1. INTRODUCCIÓN

Según el Código de Cimentaciones de Costa Rica [1], la alta sismicidad del país hace necesario establecer una definición de las zonas con suelos susceptibles a licuación para lo cual presenta siete mapas de tipos de suelos que cubren todo el territorio nacional, donde se destacan zonas con suelos que clasifican como aluviales, aluviales en zonas húmedas, arenosos, aluviales pantanosos y aluviales saturados, todos susceptibles a licuación. Algunos lugares ubicados en estas zonas han presentado evidencia de licuación ante sismos importantes. Particularmente, se ha evidenciado la licuación de suelos, documentada para los sismos de Cóbano del 25 de marzo de 1990 (Mw 7,3), el de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7), el de Puerto Armuelles del 25 de diciembre de 2003 (Mw 6,6), el de Damas del 20 de noviembre de 2004 (Mw 6,2), y el de Sámara del 5 de setiembre de 2012 (Mw 7,6) [1] [2].

Entre las zonas ubicadas en sitios con suelos susceptibles a licuación, particularmente suelos aluviales, se destaca la que abarca la ciudad de Jacó, ubicada, aproximadamente, entre las coordenadas WGS84 latitud 9,636038°, longitud -84,627556° y latitud 9,596517°, longitud -84,619060°, con una población próxima a las 18000 personas [3] y de gran importancia económica y social para el Pacífico Central del país.

Si bien existen métodos para estimar el desencadenamiento de la licuación y pronosticar si el suelo a cierta profundidad licuará o no, estos tienen la limitante que no predicen la severidad de la manifestación de la licuación en la superficie, que se puede correlacionar más directamente con el daño potencial a nivel superficial y la respuesta acumulada del depósito de suelo. Este análisis sí se puede realizar por medio de índices de severidad, como son el índice de potencial de licuación (*LPI*) y el número de severidad de licuación (*LSN*).

Aunque para este trabajo se realiza un análisis determinista, la utilidad de los resultados se basa en orientar a autoridades municipales y de emergencia a anticipar la respuesta ante la ocurrencia de un escenario de análisis u otro con condiciones intermedias, en conocer anticipadamente la distribución de los sitios donde el daño podría ser mayor para orientar los esfuerzos en cuanto a respuesta inmediata y recuperación luego de llegar a suceder un evento como los analizados. De igual manera, se espera que sirva de base inicial para futuros proyectos de análisis a escala regional para distintas zonas de Costa Rica susceptibles a licuación de suelos, y que los resultados particulares de este proyecto, si bien preliminares, sirvan como insumo para la gestión del riesgo asociado a licuación por medio de medidas ingenieriles y de otra naturaleza para efectos de ordenamiento territorial y para el desarrollo de políticas públicas para el distrito de Jacó, como podría ser un plan regulador.

2. LICUACIÓN DE SUELOS INDUCIDA POR SISMOS

Según [4], la licuación inducida por sismos se refiere a los fenómenos de generación sísmica de exceso de presiones de poro y el consiguiente ablandamiento de suelos granulares saturados, a tal punto que el mismo se comporta como un líquido perdiendo su rigidez. No obstante, hay distintos fenómenos, como explosiones, vibraciones de máquinas, entre otros, que pueden producir el mismo efecto. Para fines de este trabajo, se considera la licuación como producto

de la vibración del terreno por el paso de ondas sísmicas. Los suelos susceptibles a licuación suelen ser principalmente arenas y, en menor grado, limos y gravas. La licuación resulta de la tendencia de la estructura granular de un suelo saturado a colapsar y contraerse, o densificarse, cuando se somete a una carga cíclica, representada por la aplicación repetida de esfuerzos cortantes causados por una sacudida sísmica. Antes de la licuación, las fuerzas de contacto entre las partículas sólidas proporcionan rigidez y resistencia al suelo saturado. La tendencia a la contracción de la estructura del suelo conduce a una transferencia de la carga que había sido transportada por la estructura granular al agua intersticial que llena los vacíos entre los granos individuales del suelo, lo que resulta en un incremento de la presión de poro. Cuando la presión del agua intersticial aumenta, las fuerzas de contacto entre los granos se reducen, el suelo se deforma más fácilmente y, en el caso límite, las partículas del suelo pueden perder el contacto completamente entre sí y se suspenden. Cuanto más suelto es el suelo, mayor es el potencial de contracción bajo carga cíclica y es más fácil que el suelo se licue. La Fig. 1 muestra un esquema del proceso de licuación descrito.

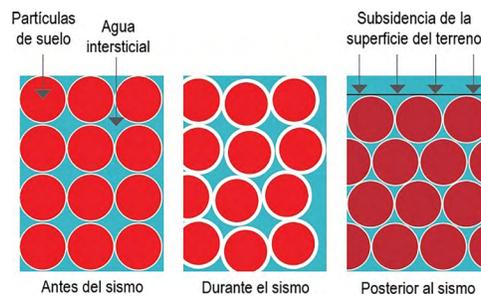
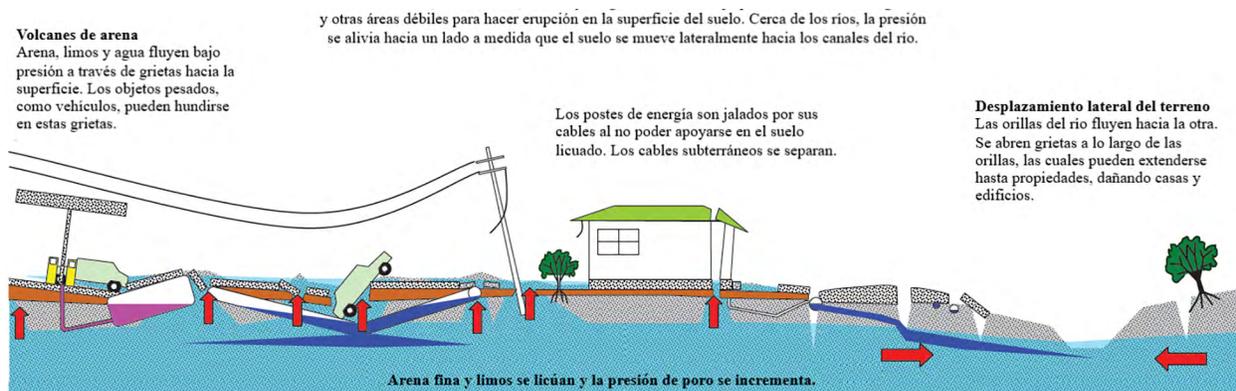


Fig. 1. Proceso de licuación de suelos. Adaptado de [5].

La pérdida de resistencia del suelo asociada con la licuación puede provocar grandes deformaciones del suelo y la incapacidad del suelo licuado de soportar los materiales superpuestos, incluidas estructuras hechas por el ser humano. Las consecuencias colaterales pueden incluir la pérdida de vidas y la destrucción de viviendas e infraestructura crítica. La recuperación después de la licuación del suelo inducida por un sismo puede ser costosa, de decenas de millones a miles de millones de dólares, y puede llevar muchos años [4]. La Fig. 2 muestra, esquemáticamente, posibles efectos de licuación sobre infraestructura durante y luego de un sismo.



Los tanques flotan en el suelo licuado y atraviesan la superficie; las tuberías se rompen, agua potable o negra se filtra al suelo.

Fig. 2. Licuación y posibles efectos sobre infraestructura. Adaptado de [5].

No debe interpretarse, empero, que después de que un suelo se licua siempre su densidad aumenta. Los flujos ascendentes debido a las presiones de agua intersticial, generadas por el sismo, pueden disminuir la compacidad de los suelos de tal manera que, incluso después del reasentarse, la densidad del suelo sea menor a la que era inicialmente. En algunos casos, el flujo lateral después de que un suelo se licua puede resultar en una reducción en la densidad del suelo, debido a un fenómeno llamado dilatación, en el que un suelo se expande en volumen cuando se somete a un esfuerzo de corte [4].

2.1 Suelos susceptibles a licuación

De acuerdo con [5], los tipos de suelos que son susceptibles a licuación son típicamente aquellos que son geológicamente jóvenes (menos de 11000 años) y que son depositados en ambientes de poca energía, formándose en capas de suelos sueltos y blandos. Si bien los suelos granulares arenosos son los más propensos a licuar, los limos de baja plasticidad o “no cohesivos” pueden licuar igualmente. [5] añade que, adicionalmente a los suelos arenosos y limosos, algunos suelos gravosos son potencialmente susceptibles a licuación.

La mayoría de los suelos gravosos pueden drenar relativamente bien, por lo que no se produciría incremento de presiones de poro durante el tiempo que es sometido a cargas cíclicas de corte; no obstante, cuando los vacíos están llenos de partículas más finas o están rodeados de suelos menos permeables, el drenaje puede verse impedido y los suelos gravosos pueden ser susceptibles de licuación. Los suelos arcillosos pueden exhibir también un comportamiento similar a la licuación, conocido como ablandamiento cíclico [5].

Las zonas que contienen depósitos de suelos potencialmente licuables son comúnmente planas y cercanas a vías fluviales, que históricamente han resultado atractivas para los asentamientos humanos y la construcción. Los terrenos reclamados al mar o rellenos no compactados o pobremente compactados cerca de vías fluviales son particularmente susceptibles a licuación, dado que en su mayoría son construidos de forma suelta y en condiciones saturadas [5].

2.2 Clasificación del grado de daño inducido por licuación

El Ministerio de Comercio, Innovación y Trabajo de Nueva Zelanda [5] propone tres grados de daño por licuación del terreno. Esta clasificación fue desarrollada basada en las observaciones realizadas a raíz de la secuencia de sismos que afectó a la región de Canterbury, Nueva Zelanda, en los años 2010 a 2011. El Cuadro I muestra una descripción de las consecuencias a nivel del terreno según el grado de daño.

CUADRO I
GRADO DE DAÑO INDUCIDO EN EL TERRENO POR LICUACIÓN
ADAPTADO DE [5]

Grado de daño inducido en el terreno	Consecuencias típicas a nivel superficial
Nulo a menor	<ul style="list-style-type: none"> • Sin signos de material licuado expulsado en la superficie del terreno. • No más que asentamientos diferenciales menores de la superficie del suelo (ondulaciones de menos de 25 mm de altura). • Sin movimiento aparente de extensión lateral del suelo (solo grietas mínimas en el suelo). • La licuación no causa daño o solo daña cosméticamente a los edificios e infraestructura (pero aún pueden producirse daños, debido a otros efectos del terremoto).
Menor a moderado	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidades menores o moderadas de material licuado expulsado en la superficie del terreno (por ejemplo, menos del 25 % de un sitio residencial típico cubierto); y/o • Asentamiento diferencial moderado de la superficie del suelo (por ejemplo, ondulaciones de 25 a 100 mm de altura). • Ningún movimiento lateral de extensión de suelo significativo (grietas en el suelo de menos de 50 mm de ancho, pero patrón de agrietamiento sugiere que la causa es principalmente una oscilación o asentamiento del suelo en lugar de extensión lateral). • La licuación causa daños moderados, pero típicamente reparables a edificios e infraestructura. El daño puede ser sustancialmente menor cuando la licuación se abordó durante el diseño (cimientos mejorados).
Moderado a severo	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes cantidades de material licuado expulsado en la superficie del suelo (más del 25 % de un sitio residencial típico cubierto); y/o • Asentamiento diferencial moderado a severo de la superficie del suelo (ondulaciones de más de 100 mm de altura); y/o • Movimiento significativo del suelo que se extiende lateralmente (grietas en el suelo de más de 50 mm de ancho, con un patrón de agrietamiento que sugiere la dirección de movimiento cuesta abajo o hacia una cara libre). • La licuación causa daños sustanciales y perturba los edificios e infraestructura, y la reparación puede ser difícil o antieconómica en algunos casos. El daño puede ser sustancialmente menor y es más probable a ser reparable donde se abordó la licuación durante el diseño (cimientos mejorados y reforzamiento robusto de la infraestructura).

2.3 Manifestaciones superficiales de licuación

La influencia de una capa de sello no licuable, de espesor H_1 , en la contención de la manifestación superficial de la licuación de una capa subyacente, de espesor H_2 , fue cuantificada por Ishihara [6], basado en observaciones de campo. Ishihara relacionó el mínimo valor necesario de H_2 para que la licuación se manifestara en la superficie de H_1 . La Fig. 3 muestra las curvas

límite H_1 - H_2 desarrolladas por Ishihara a partir de observaciones de campo en varios sismos y criterio profesional. El punto en el cual las curvas límite se vuelven verticales representan un espesor de capa de sello luego de la cual no hay manifestación superficial de licuación, independientemente del espesor de la capa licuada subyacente.

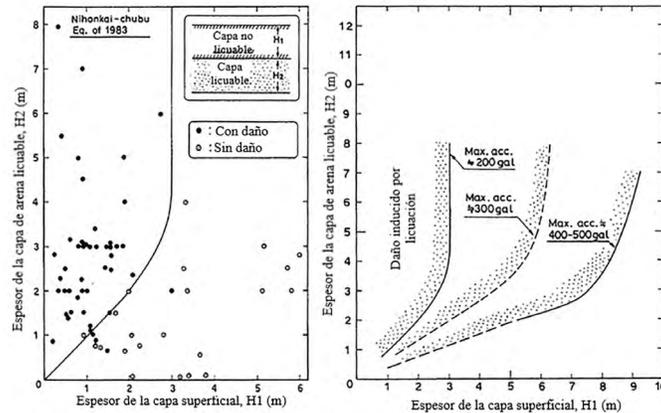


Fig. 3. Condiciones de estratificación del terreno requeridas para tener manifestación en superficie de licuación. Adaptado de [4].

La Fig. 3 puede ser aplicada a un sistema de dos capas compuesto por una capa de sello no licuable sobre una capa licuable. No obstante, su aplicación es difícil a sistemas estratificados con múltiples capas licuables-no licuables intercaladas. Otra limitante de la propuesta de Ishihara es que no puede identificar los casos en que los asentamientos de una capa licuable no dan lugar a manifestaciones superficiales, tales como asentamientos diferenciales o agrietamientos de la capa superficial del suelo.

Si los asentamientos por licuación debajo de una capa sello no licuable son de preocupación ingenieril, se puede evaluar el potencial de esos asentamientos utilizando índices de severidad, como los presentados a continuación, para considerar las implicaciones ingenieriles del asentamiento estimado.

En [7], se utilizaron los conceptos resumidos en la Fig. 3 como guía para mitigar daños por licuación para sistemas de cimentación superficiales, creando una capa equivalente no licuable de sello por debajo de las estructuras. Mientras que este concepto ha sido aplicado a casos con una capa uniforme no licuable, los casos históricos utilizados para dar soporte a este concepto son limitados, particularmente con respecto a magnitud de sismo e intensidad, por lo que su aplicabilidad a futuro debe ser revisada por medio de nuevos casos que se puedan registrar.

2.4 Índices de severidad de licuación

Los índices de severidad o índices de daño potencial por licuación están propuestos para proporcionar una medida de la severidad de las manifestaciones superficiales basados en la respuesta acumulada a la licuación del perfil del terreno [4].

Se han propuesto varios índices de severidad o potencial de daño, entre ellos: el índice de potencial de licuación (*LPI*) [8]; el índice de potencial de licuación inspirada en Ishihara

(LPI_{ISH}) [9]; el asentamiento por reconsolidación volumétrica unidimensional (S_{IVD}) y el número de severidad de licuación (LSN) [10].

2.4.1. Índice de potencial de licuación (LPI)

El índice de potencial de licuación o LPI propuesto por Iwasaki et al. [8] provee un índice ponderado del potencial de desencadenamiento de licuación en un sitio. El valor de LPI se calcula como:

$$LPI = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz \quad (1)$$

$$F = 1 - (FS) \text{ para } FS \leq 1 \quad (2)$$

$$F = 0 \text{ para } FS > 1 \quad (3)$$

FS es el factor de seguridad contra licuación obtenido por medio de un procedimiento de simplificado de evaluación de licuación basado en esfuerzos. Además, $w(z)$ es una función de ponderación lineal dada por

$$w(z) = 10 - 0,5 \cdot z \quad (4)$$

z es la profundidad en m por debajo de la superficie del terreno y $w(z) = 0$ para $z > 20$ m.

El índice resultante depende del espesor de las capas licuables en los 20 m superiores, la proximidad de estas capas a la superficie del suelo y la cantidad por la cual el factor de seguridad contra licuación es inferior a la unidad. A diferencia del procedimiento de Ishihara [8], el LPI se puede aplicar a un perfil con múltiples capas licuables. El LPI puede oscilar entre 0 (sin capas con un factor de seguridad menor a 1 en los 20 m superiores de suelos) hasta un máximo de 100 (el factor de seguridad contra licuación es cero para todas las capas en los 20 m superiores). Un análisis de datos de 45 sitios que licuaron durante el terremoto de 1964 en Niigata, Japón mostró que se produjo una licuación severa en sitios donde el $LPI > 15$, y poca licuación ocurrió donde el $LPI < 5$ [6]. Se han desarrollado mapas de amenaza de licuación utilizando el marco de LPI para regiones sísmicas en muchas partes del mundo [4].

En [9], se emplearon una función de ponderación de potencia en profundidad (es decir, $1/z$, donde z es profundidad) en lugar de la función lineal utilizada en el marco LPI original. También modificaron el marco de LPI para tener en cuenta el espesor límite de la capa sello no licuable en el gráfico H_1 - H_2 desarrollado por Ishihara. El índice de severidad revisado que incorporó estas modificaciones, nombradas por Maurer *et al.* [9] como índice de potencial de licuación inspirado en Ishihara o LPI_{ISH} , redujo el número de predicciones falsas positivas (es decir, casos en los que las manifestaciones se predijeron, pero no se observaron) en sesenta casos históricos de seis sismos ocurridos en Taiwán, Turquía, Nueva Zelanda y Estados Unidos. Concretamente, de los sesenta casos analizados, el 31 % de los casos sin manifestación tenían

$LPI < 5$, mientras que el 100 % de los casos sin manifestación, los casos tenían $LPI_{ISH} < 5$. El LPI y el LPI_{ISH} funcionaron igualmente bien, sin embargo, en predecir verdaderos positivos (casos en los que se observaron manifestaciones como se predijo), con un 94 % de estos casos correctamente identificados con cualquiera de los índices.

El valor de LPI_{ISH} se calcula como

$$LPI_{ISH} = \int_0^{20\text{ m}} F(FS) \frac{25,56}{z} dz \quad (5)$$

donde

$$F(FS) = 1 - FS \text{ si } FS \leq 1 \cap H_1 \cdot m(FS) \leq 3 \quad (6)$$

caso contrario es cero. Y

$$m(FS) = \exp\left(\frac{5}{25,56(1-FS)}\right) - 1 \quad (7)$$

donde H_1 se define igual que H_1 en la Fig. 3, y z es la profundidad a la capa de interés en m por debajo de la superficie del suelo.

Aunque el LPI_{ISH} muestra mejores capacidades predictivas que el LPI , este todavía puede producir predicciones incorrectas de las consecuencias de la licuación. Como resultado, todavía existe la necesidad de un mayor desarrollo de los índices de daño por licuación para ser considerados cien por ciento confiables.

2.4.2 Asentamientos volumétricos por reconsolidación unidimensional (S_{1VD}) y el Número de Severidad de Licuación (LSN)

Similar al LPI_{ISH} , el número de severidad de licuación (LSN) utiliza una función de ponderación de potencia en profundidad (es decir, $1/z$, donde z es profundidad) para determinar la respuesta acumulada de un perfil a la licuación. También incluye contribuciones de todas las capas que tienen un $FS < 2$ (a diferencia del uso de solo capas con $FS < 1$ al calcular el LPI). El LSN se calcula como:

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (8)$$

donde ε_v es la deformación volumétrica post-sismo calculada a la profundidad z (en m) expresada en forma decimal. Para calcular la deformación volumétrica, van Ballegooy *et al.* [10] utilizaron el método propuesto por Ishihara y Yoshimine [11], implementado por Zhang *et al.* [11] con datos CPT. En el método de Ishihara & Yoshimine [11], las deformaciones volumétricas post-licuación se calculan en función del factor de seguridad requerido para desencadenar la licuación. Debido a que las deformaciones volumétricas de la relación de Zhang *et al.* [12] son auto limitantes, el LSN alcanza un valor máximo límite a medida que disminuye el factor de seguridad. Este valor límite es una función de la densidad relativa del suelo, lo que da como

resultado un LSN máximo para un perfil de suelo dado, independientemente de la intensidad del movimiento del suelo (p. ej., aceleración máxima del suelo o PGA).

Similar al LPI , el LSN se correlacionó bastante bien con la gravedad de las manifestaciones superficiales observadas durante la secuencia de sismos de Canterbury, Nueva Zelanda, ocurrida durante entre el 2010- 2011, en áreas donde la licuación no se manifestó en forma de desplazamientos laterales y para perfiles que no tenían una capa de sello de arcilla o múltiples capas no licuables intercaladas con las capas licuables [4]. La deformación volumétrica acumulada de las capas licuables en el perfil del suelo, S_{1VD} , no fue tan precisa como el LPI o el LSN . Una comparación de la precisión de LSN versus la precisión de LPI_{ISH} no fue concluyente según van Ballegooy *et al.* [7].

2.5 Deformaciones del terreno inducidos por licuación

La reducción significativa de la rigidez y resistencia de los suelos debido a la acumulación de exceso de presión de poro resulta en grandes deformaciones por cizallamiento en el suelo durante una intensa sacudida del suelo. Las deformaciones por cizallamiento cíclicas (transitorias) máximas suelen oscilar entre el 2 % en arenas densas y el 4 % en arenas sueltas, dando lugar a grandes desplazamientos laterales cíclicos de la capa licuada [13]. Es importante considerar estos grandes movimientos laterales cíclicos, porque puede generar cargas cinemáticas significativas en estructuras enterradas y cimentaciones profundas.

El comportamiento posterior a la licuación se caracteriza por un proceso complejo que implica la disipación del exceso de presión de poro, sedimentación, re-solidificación, y re-consolidación del suelo licuado, resultando eventualmente en asentamiento del suelo. La pérdida de volumen de suelo debido a la eyección de arena en la superficie del suelo también puede contribuir significativamente a la generación de asentamientos totales o diferenciales. Estos asentamientos inducidos por licuación pueden ocurrir durante y después de la sacudida sísmica, y pueden ser significativos, incluso para sitios de terreno llano en campo libre, es decir, sin la presencia de una estructura superpuesta.

El asentamiento inducido por licuación no debe ser malinterpretado como densificación del suelo o un indicador de un aumento en la resistencia a la licuación de los suelos licuados. Al contrario, la licuación resulta generalmente en suelos no homogéneos, volcanes de eyección, debilidades en el suelo y en una estructura del suelo post-licuación con baja resistencia a la licuación.

Las magnitudes de los desplazamientos de suelo inducidos por licuación están relacionadas, generalmente, con el factor de activación de licuación, FL , y al espesor total de la capa licuada. Basado en una interpretación de estas relaciones, [13] propone un resumen del desempeño de depósitos de suelos licuados, el cual se muestra en el Cuadro II.

CUADRO II
NIVELES DE DESEMPEÑO GENERALES DE DEPÓSITOS LICUADOS,
ADAPTADO DE [13]

Nivel de desempeño	Efectos por exceso de presión de poro y licuación	Características de la licuación y consecuencias	Valores característicos de F_L , LPI , LSN
L0	Insignificantes	Excesos de presiones de poro no significativos, no hay licuación.	$F_L > 1,4$ $LPI = 0$ $LSN < 10$
L1	Leves	Excesos de presiones de poro limitados, deformación despreciable del terreno y pequeños asentamientos.	$F_L > 1,2$ $LPI = 0$ $LSN = 5-15$
L2	Moderados	La licuación ocurre en capas de espesor limitado (pequeña proporción del depósito, 10 % o menos) y extensión lateral; las deformaciones del suelo resultan en asentamientos diferenciales relativamente pequeños.	$F_L = 1,0$ $LPI < 5$ $LSN = 10-25$
L3	Altos	La licuación ocurre en una porción significativa del depósito (del 30 % al 50 % del depósito), resultando en desplazamientos laterales transitorios, movimientos diferenciales moderados y asentamientos del terreno en el orden de 100 mm a 200 mm.	$F_L = 1,0$ $LPI = 5-15$ $LSN = 15-35$
L4	Severos	Licuación completa se desarrolla en la mayor parte del depósito, resultando en grandes desplazamientos laterales del suelo, asentamientos totales y diferenciales de más de 200 mm.	$F_L \ll 1,0$ $LPI > 15$ $LSN > 30$
L5	Muy severos	La licuación da como resultado desplazamientos laterales (flujo), grandes desplazamientos laterales permanentes del terreno y/o distorsión significativa del suelo (deformaciones laterales/ estiramiento, desplazamientos verticales y distorsión angular).	-

La licuación de capas de suelos relativamente delgadas cercanas a la superficie podría ser muy dañina y producir efectos equivalentes a los niveles de rendimiento L3 y L4. Una capa licuada relativamente delgada con baja resistencia residual podría producir extensión lateral y efectos consecuentes muy severos (nivel de desempeño L5).

Los índices LPI y LSN cuantifican el daño inducido por licuación al combinar los efectos de la severidad de la licuación (valor de F_L o FS), el espesor de los suelos licuados y su ubicación dentro el perfil del suelo. Los valores umbral de estos índices que se muestran en el Cuadro II, en relación con los niveles de rendimiento, son solo valores indicativos. Estos umbrales pueden

variar y no cubren todos los casos de licuación (escenarios y condiciones del terreno). Estos índices son típicamente utilizados para analizar un área grande y en tales aplicaciones tienen una capacidad de predicción razonable.

Al ser todos iguales (es decir, F_L , espesor y ubicación de la capa licuada), las consecuencias de la licuación y la magnitud de la deformación del suelo inducida por la licuación depende, en gran medida, de la densidad del suelo. El índice LSN cuantifica este efecto de manera simplificada. La severidad de los efectos de la licuación disminuye con el aumento de la densidad de los suelos y, lo que es más importante, el mecanismo de deformación del suelo también cambia a medida que aumenta la densidad del suelo (por ejemplo, la licuación de flujo, la licuación de tensión cero-efectiva y la licuación transitoria de tensión casi cero con movilidad cíclica son tipos característicos de comportamiento asociados con arenas muy sueltas, sueltas a medias densas y densas, respectivamente).

Los rangos proporcionados en el Cuadro II se basan en cálculos de activación utilizando el método de Boulanger e Idriss [14], y en el análisis e interpretación de los efectos de la licuación en los terremotos de Canterbury de 2010-2011.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1 Ubicación geográfica de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al distrito de Jacó, cantón de Garabito, provincia de Puntarenas, Costa Rica. La propia ciudad de Jacó, cabecera del distrito homónimo, se ubica, aproximadamente, entre las coordenadas WGS84 latitud $9,636038^\circ$, longitud $-84,627556^\circ$ y latitud $9,596517^\circ$, longitud $-84,619060^\circ$ y cuenta con una población cercana a las 18000 personas [3]. La Fig. 4 muestra la ubicación de la zona de estudio respecto a Costa Rica.

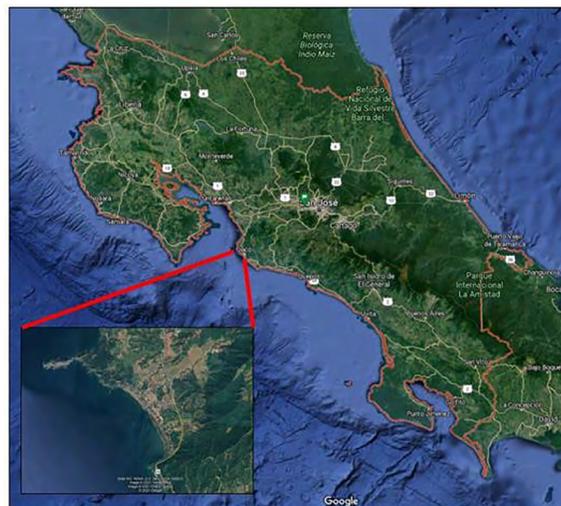


Fig. 4. Ubicación de la zona de estudio respecto a Costa Rica. Tomado de [15].

De acuerdo con Gómez *et al.* [16], la zona en estudio se ubica dentro de la cuenca Jacó, la cual tiene una extensión de 47 km², y consiste en tres micro cuencas correspondientes a los ríos Pueblo Nuevo (Mona), Copey y Naranjal. Un acuífero se ubica en la parte baja y media de estas micro cuencas, asentado en depósitos no consolidados, con una extensión aproximada de 15 km². La Fig. 5 muestra el área de la cuenca Jacó.

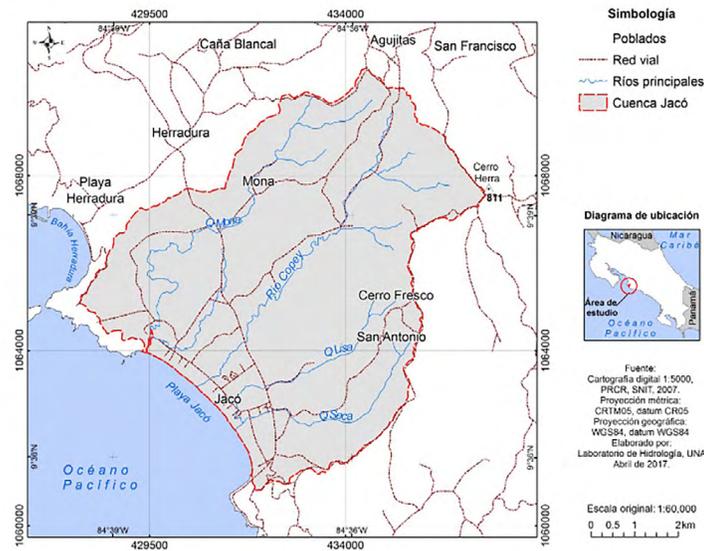


Fig. 5. Ubicación de la zona de estudio en cuenca Jacó. Tomado de [16].

3.2. Amenazas geológicas de la zona de estudio

De acuerdo con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias [17], el cantón de Garabito se localiza en una región sísmica caracterizada por el choque de las placas Cocos y Caribe.

Estos eventos suelen tener magnitudes altas, a profundidades mayores a los 20 km, con epicentros alejados de los centros de población. Hay registros históricos de sismos de importancia frente a las costas del Pacífico costarricense, que han causado daños de relevancia en el cantón.

Históricamente, para la ciudad de Jacó, la Red Sismológica Nacional destaca dos sismos. El primero ocurrió el 12 de noviembre de 2017, 22 km al sur de la ciudad de Jacó, con una profundidad de 18 km y una magnitud de 6,3 Mw, con una intensidad VI en la Escala de Intensidad Mercalli Modificada, siendo su origen la subducción de la placa Cocos respecto a la placa Caribe. Este sismo se destaca por haber sido el primero de magnitud mayor a 6,0 localizado en la zona sismogénica interplaca frente a Jacó desde la fundación de la Red Sismológica Nacional en 1973 [18].

El segundo sismo corresponde al del 24 de agosto de 2020, con una profundidad de 23,5 km y una magnitud de 6,0 Mw, con una intensidad VI en la Escala de Intensidad Mercalli Modificada para la ciudad de Jacó, siendo su origen la subducción de la placa Cocos respecto a la placa Caribe. Este sismo se destaca por haber sido el segundo de magnitud mayor a 6,0 localizado en la zona sismogénica interplaca frente a Jacó desde la fundación de la Red Sismológica Nacional [19].

Según la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias [17], entre los efectos geológicos más importantes de un sismo cerca del cantón de Garabito están la amplificación de ondas sísmicas y la licuación del terreno, estando ubicada la ciudad de Jacó en terrenos susceptibles a presentar ambos fenómenos.

3.3 Susceptibilidad a licuación para la zona de Jacó

En Costa Rica, se destacan como potencialmente licuables las zonas aluviales costeras y las llanuras de inundación de los ríos más importantes. Las investigaciones realizadas hasta el 2003 han permitido establecer que las planicies de inundación de los ríos Reventazón, Pacuare, Chirripó, Parismina, Banano, Bananito, Vizcaya, Estero, Savegre y Térraba en la costa Pacífica de Costa Rica reúnen condiciones para que ocurra licuación [1]. El propio Código de Cimentaciones de Costa Rica [1] presenta una zonificación de los tipos de suelos de Costa Rica, entre los que se destacan los suelos aluviales, los suelos aluviales en zonas húmedas, los suelos arenosos, los suelos aluviales pantanosos y los suelos aluviales saturados como susceptibles a sufrir licuación.

Se presenta en la Fig. 6 el mapa de tipos de suelos de la Hoja Quepos (escala 1:600000) del Código de Cimentaciones de Costa Rica [1], en la que se destaca la ubicación de la ciudad de Jacó en suelos que se clasifican como suelos aluviales. La zona de análisis corresponde a la resaltada en color naranja en la Fig. 7, con un área de aproximadamente 11,3 km².



Fig. 6. Mapa de tipos de suelos de la hoja Quepos. Tomado de [1].

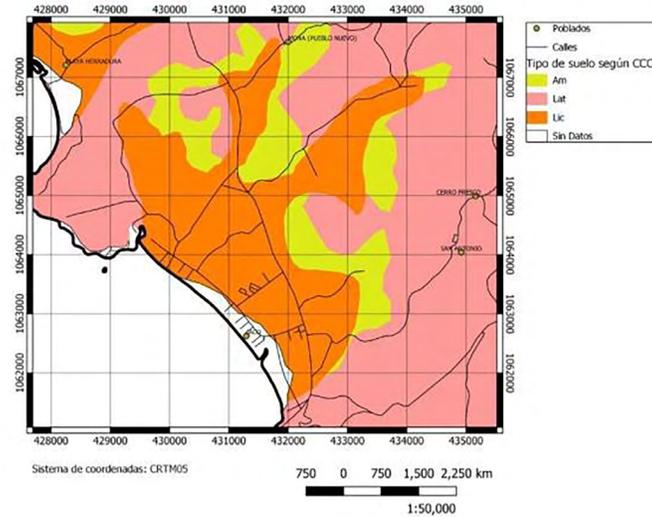


Fig. 7. Mapa de tipos de suelos para zona de Jacó. Adaptado de [1].

Bogantes *et al.* [20] indican que estos suelos tienen su origen en la deposición de los materiales finos (limos y arcillas) arrastrados por los ríos, por lo que son típicos de las llanuras aluviales del país. Por ser suelos de tipo transportado, sus características y estratigrafía son muy variables, tanto en planta como en profundidad. Por la topografía plana en la que se ubican, frecuentemente presentan un nivel freático superficial, lo que, aunado a su bajo contenido de arcillas, los hace susceptibles a licuarse en caso de sismo. Destacan por su susceptibilidad a licuarse durante sismos fuertes. Por su origen transportado, son suelos en general blandos, y, por sus constituyentes no cohesivos (limos y arenas), son suelos permeables. Como en otros suelos transportados, es muy factible encontrar estratos blandos subyacentes.

3.4 Contexto hidrogeológico de la zona de estudio

Los suelos aluviales identificados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica corresponden con una unidad lito estratigráfica asociada a depósitos no consolidados [16]. Según Gómez *et al.* [16], todos los depósitos recientes asociados a depósitos por gravedad al pie de las montañas o coluvies y todos los relacionados a procesos aluviales pertenecen a esta unidad. También, los depósitos de materiales arenosos con influencia marina. Los depósitos asociados a material arrastrado por la acción fluvial o de la gravedad son generalmente fragmentos de rocas de diversos tamaños y de composición inmersa en una matriz limo- arcilla arenosa. Hacia el pie de las montañas, los bloques de fragmentos son de mayor tamaño y sub redondeadas o redondeadas, mientras que hacia la parte baja de la cuenca, donde se ubica la zona de estudio, los fragmentos son más pequeños, dado que han sido arrastrados una mayor distancia, como evidencia de su menor grado de angulosidad. La Fig. 8 muestra un mapa geológico de la zona de estudio [16].

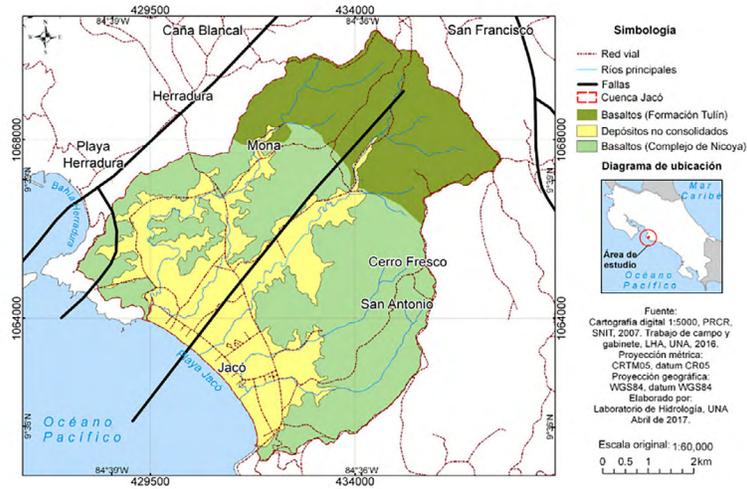


Fig. 8. Mapa geológico de la zona de estudio. Tomado de [16].

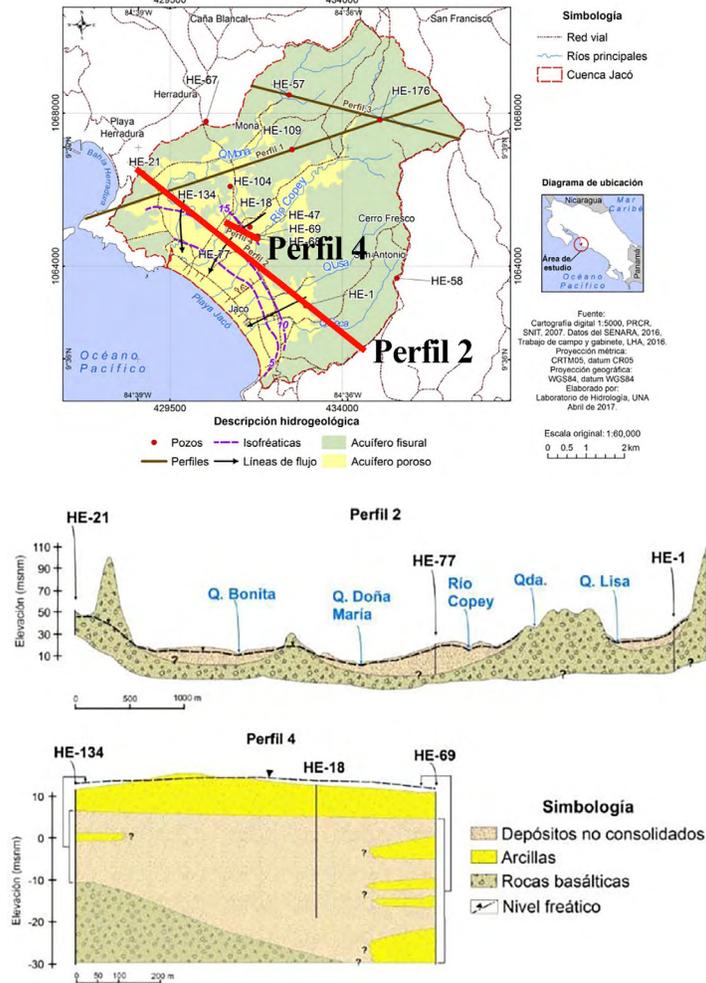


Fig. 9. Mapa hidrogeológico de la zona de estudio. Tomado de [16].

La Fig. 9 muestra el mapa hidrogeológico de la zona donde se destacan dos perfiles geológicos de la zona en análisis (perfiles 2 y 4).

En la zona de estudio, se ubican dos estaciones sísmicas propiedad del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, las cuales clasifican el tipo de sitio como S3, según la normativa costarricense, con un valor de V_{s30} de 324 m/s para la estación PJAC [21], única para la cual se aporta este dato. Según el perfil de V_s de esta estación, el terreno se compone de suelos rígidos hasta los 23,7 m de profundidad con un valor de V_s de 295 m/s, de los cuales se tienen suelos muy densos o roca blanda hasta los 91,4 m, con un valor de V_s de 521 m/s.

3.5 Agua subterránea de la zona de estudio

De acuerdo con Gómez *et al.* [16] el nivel de agua subterránea en la zona de estudio se ubica entre los 1 y 5 m de profundidad. Dicha conclusión concuerda con las mediciones tomadas en los sondeos CPT realizados, con unas variaciones entre los 0,30 y 6,00 m en los sondeos donde se midió el nivel freático. Estos sondeos se realizaron entre los meses de junio y agosto de 2021, que corresponden con la época lluviosa de la zona que va de mayo a noviembre [16].

3.6 Zonificación sismo genética de la zona de estudio

Climent *et al.* [22] presentan una zonificación sismo genética para Costa Rica, tomando en consideración criterios como patrones de fallamiento, mecanismos de ruptura, tamaño de las zonas de ruptura de terremotos pasados, entre otros, dando como resultados zonas sísmicas delimitadas geoméricamente en tres dimensiones y regidas por el mismo proceso de producción de sismos.

3.6.1 Zonificación sísmica asociada a fallas corticales para la zona de estudio

Para la zonificación para fallas corticales o superficiales, con profundidades de ruptura entre 0 y 25 km, se puede ubicar la zona de estudio en la zona sísmica Antearco Pacífico Central [22]. Por la extensión de las fallas enmarcadas en esta zona, se podría esperar un evento máximo de magnitud 7,1 Mw.

De acuerdo con el Atlas Tectónico de Costa Rica [23], la zona de estudio es atravesada por una falla inferida o probable del Terciario y/o Cretácico, y cerca pasan dos fallas del Cuaternario, La Falla Tárcoles y la Falla Herradura. La Falla Herradura tiene una longitud de 7 km y con movimiento vertical. Tiene un potencial de generar sismos de magnitud 5,6 Mw con aceleraciones de 0,2 g y una intensidad máxima VIII en la zona epicentral [24]. La Falla Tárcoles, por su parte, tiene una longitud de 55 km y es de tipo inversa con una componente transcurrente. Tiene un potencial de producir sismos de magnitud 7,0 Mw con aceleraciones de 0,5 g a 0,6 g a lo largo de la zona de ruptura, con intensidades entre VIII y IX en Jacó [25]. Históricamente, para la ciudad de Jacó se han registrado sismos importantes. Climent *et al.* [22] destacan un sismo asociado a la Falla Tárcoles ocurrido en 1924 de Mw 7,0 que alcanzó intensidades máximas de X.

Para ambas fallas, como para el resto de fallas activas en Costa Rica, el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica ha planteado escenarios simulados de eventos máximos posibles de acuerdo a la longitud de cada falla, para un sismo con una profundidad de 10 km. Para el caso de la Falla Tárcoles, para un sismo de magnitud Mw 7,0 con una profundidad de 10 km, se podrían esperar en la zona de estudio aceleraciones cercanas a los 0,20 g; mientras

que, para la Falla Herradura, para un sismo de magnitud Mw 5,6 con una profundidad de 10 km, se podrían esperar en la zona de estudio aceleraciones cercanas a los 0,20 g [24] [25]. Las Fig. 10 y 11 muestran los mapas de aceleración máxima para las respectivas fallas y respectivos sismos a una profundidad de 10 km.

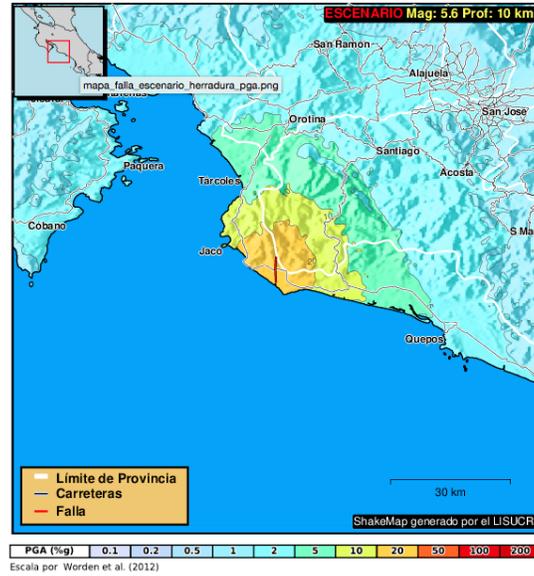


Fig. 10. Mapa de aceleración máxima para posible sismo de Mw 5,6 a 10 km de profundidad para falla Herradura. Tomado de [24].

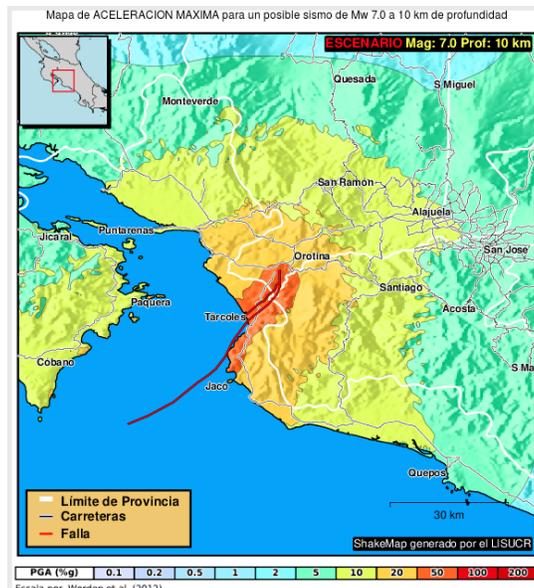


Fig. 11. Mapa de aceleración máxima para posible sismo de Mw 7,0 a 10 km de profundidad para falla Tárcoles. Tomado de [25].

3.6.2 Zonificación sísmica relacionada con la subducción para la zona de estudio

Climent *et al.* [22] definen dos fuentes sísmicas asociadas con el proceso de subducción de la placa Caribe sobre la Cocos. Estas fuentes se definen de acuerdo con el mecanismo de producción de sismos y la profundidad de las mismas, dando como resultados una zona sísmica

de subducción interplaca, con generación de sismos entre los 25 y 60 km de profundidad, y otra zona intraplaca con generación de sismos con profundidades mayores a 60 km.

El área en estudio se ubica según Climent *et al.* [22] en la zona sísmica interplaca Quepos, la cual podría generar sismos máximos de 7,2 Mw. Respecto a la zonificación intraplaca, el área en estudio se ubica en la zona sísmica intraplaca Central, la cual podría generar eventos máximos del orden de 7,5 Mw.

La Fig. 12 muestra el modelo en perfil de las zonas sísmicas en profundidad propuesto por Climent *et al.* [22] para Costa Rica.

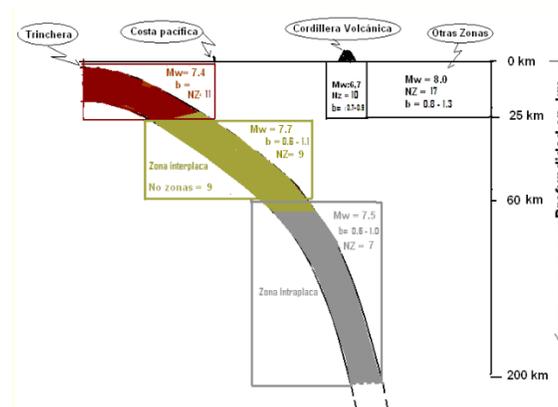


Fig. 12. Modelo en perfil de zonas sísmicas en profundidad para Costa Rica.
Tomado de [22].

3.7 Topografía de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde con llanuras aluviales de topografía relativamente plana, correspondientes a zona de deposición de baja energía, rodeada por montañas con elevaciones aproximadas a los 120 m sobre el nivel del mar (msnm) al oeste, 250 msnm al este y 500 msnm al norte. La propia zona de análisis se ubica entre los 60 msnm, aproximadamente, y cero msnm (zona de playa).

La Fig. 13 muestra la ubicación en planta de dos secciones topográficas obtenidas de Google Earth, mientras que las Fig. 14 y 15 muestran la variación de elevaciones para dichas secciones.



Fig. 13. Ubicación en planta de perfiles topográficos para zona de estudio.
Tomado de [26].



Fig. 14. Perfil topográfico A-A'. Tomado de [26].

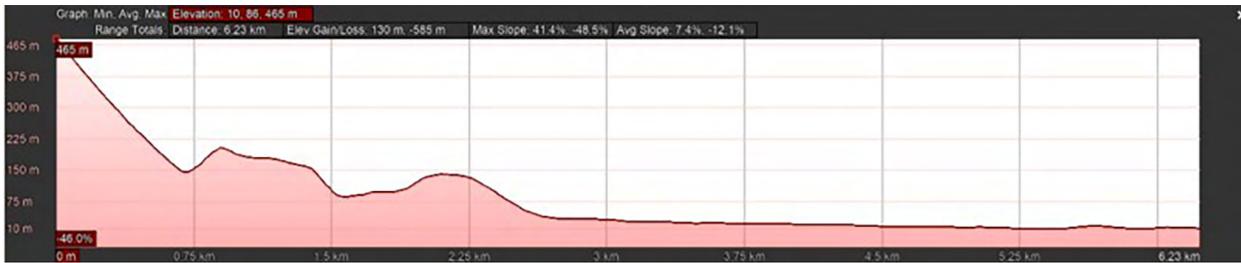


Fig. 15. Perfil topográfico B-B'. Tomado de [26].

La Fig. 16 muestra una imagen aérea con la variación de elevaciones a partir de curvas de nivel cada 40 m tomada de [15], donde se observan los barrios de la ciudad de Jacó, usados de referencia para los análisis de resultados.

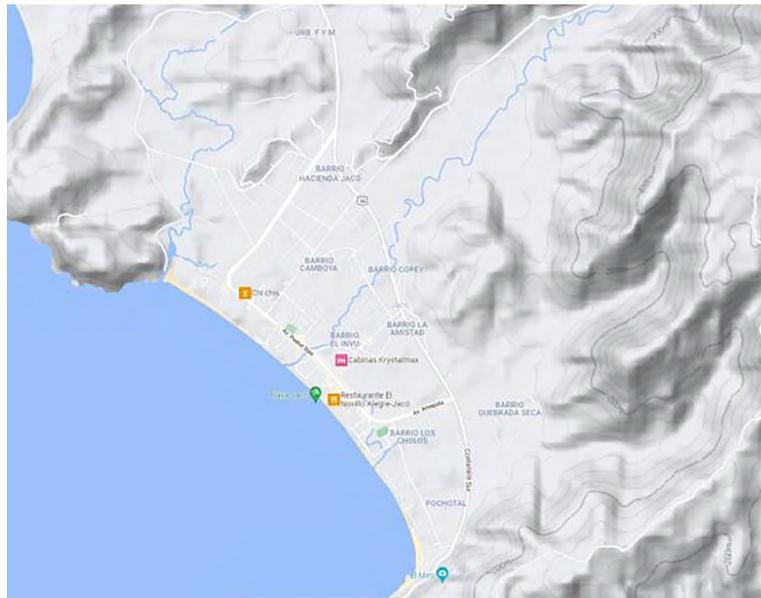


Fig. 16. Variación de elevaciones a partir de curvas de nivel a cada 40 m para la zona de estudio. Tomado de [15].

3.8 Sondeos CPTu

Se realizaron en total quince sondeos CPTu con una profundidad máxima de investigación correspondiente a la de rechazo del cono, la cual se muestra en el Cuadro III.

CUADRO III
 PROFUNDIDAD DE RECHAZO DEL CONO PARA CADA SONDEO

Sondeo	Profundidad de rechazo (m)
C-1	10,14
C-2	11,09
C-3	13,41
C-4	7,65
C-5	19,71
C-6	13,01
C-7	13,62
C-8	6,71
C-9	13,64
C-10	4,61
C-11	5,99
C-12	3,99
C-13	5,53
C-14	17,92
C-15	23,94

Para la ejecución de los sondeos, se utilizó una máquina de perforación marca TMG modelo CPT-223 con una capacidad de empuje de 20 t y un cono marca Vertek modelo HT Series 10 cm²/10 t con medición de poro en la posición u_2 . Para la interpretación de los datos, se aplicó un filtro de correlación cruzada entre la resistencia del cono, q_c , y la resistencia por fricción, f_s , para compensar el desfase entre las profundidades en las que se miden ambos parámetros.

La Fig. 17 muestra la ubicación de los sondeos CPTu realizados en una imagen aérea de la zona de estudio, y la Fig. 18 la ubicación de los sondeos respecto al mapa de suelos del Código de Cimentaciones de Costa Rica [1].

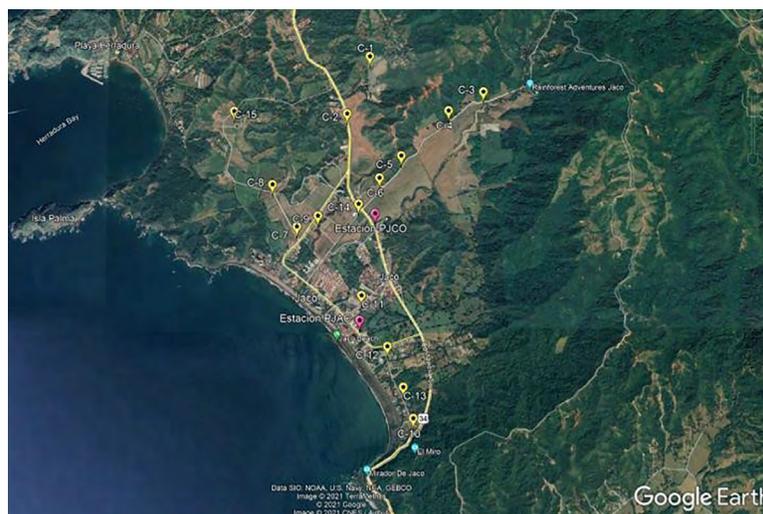


Fig. 17. Ubicación de sondeos en imagen de Google Earth. Tomado de [15].

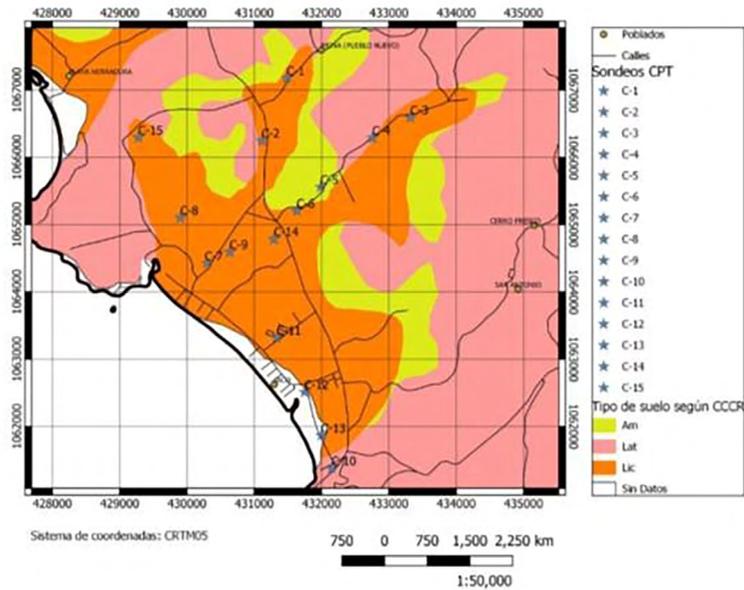


Fig.18. Ubicación de sondeos en mapa de tipo de suelos según Código de Cimentaciones de Costa Rica.

3.9 Descripción geotécnica de la zona de estudio

Al tratarse de una zona tan extensa las condiciones geotécnicas varían de un punto a otro, por lo tanto, no se tiene un perfil geotécnico homogéneo que permita describir toda el área analizada. No obstante, se puede indicar, de forma general, que a nivel superficial se identificaron arenas, arenas limosas y limos arenosos de densidad relativa suelta a media, subyacidas por arenas de compacidad, variando entre suelta y densa, con intercalaciones de arcillas y arcillas limosas a diferentes profundidades del perfil según la ubicación de los sondeos, de consistencia variante entre suave y dura.

3.10 Método de análisis, magnitud de sismos, aceleraciones máximas y escenarios de análisis

Para la determinación del desencadenamiento de la licuación, se hizo uso del método de Boulanger y Idriss [14]. La escogencia de este método sobre otros se hizo en función a que este considera de una manera más precisa la forma de la curva de resistencia a licuación, que depende del tipo de suelo y su densidad, como se ha observado en ensayos de laboratorio [10].

Para la determinación de las magnitudes de sismos a considerar en los análisis, se tomó de referencia la zonificación sismo genética realizada por Climent *et al.* [22] para Costa Rica, que separa las fuentes en relacionadas con el proceso de subducción, tanto interplaca como intraplaca, así como en relacionadas con sistemas de fallas corticales.

Sobre los sismos por subducción, Climent *et al.* [22] identifican dos zonas sísmicas, una de subducción interplaca y otra intraplaca. El área en estudio se ubica en la zona sísmica interplaca Quepos con sismos máximos esperables de hasta 7,2 Mw. Por su parte, el área en estudio se

ubica en la zona sísmica interplaca Central, la cual podría producir sismos máximos cercanos a 7,5 Mw.

Sobre los sismos corticales, la zona del proyecto se ubica en la zona sísmica Antearco Pacífico Central con un potencial de producir un sismo máximo de magnitud 7,1 Mw [22]. El Laboratorio de Ingeniería Sísmica identifica dos fallas activas en la zona de estudio, la Herradura y la Tárcoles, descritas en el apartado 3.6 anterior, las cuales muestran un potencial de producir sismos máximos de una magnitud congruente con la propuesta por Climent *et al.* [22] para sismos corticales en la Zona Pacífico Central, de magnitud 5,6 Mw y 7,0 Mw, respectivamente, para la ruptura total de la falla a una profundidad de 10 km.

Para la determinación de las aceleraciones máximas a considerar en los análisis, se hizo uso de las ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para sismos corticales y de subducción propuestas por Schmidt [27] para América Central. Se analizan escenarios considerando aceleraciones iguales a la media y a la media más una desviación estándar para cada caso.

Dadas las anteriores consideraciones, junto a las variaciones máximas del nivel freático, que se estiman para la zona por Gómez *et al.* [16], se analizan los siguientes escenarios:

Escenarios para sismos corticales

1. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,0 Mw, distancia hipocentral 10 km, aceleración 0,52 g (1,34 g, considerando una desviación estándar).
2. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,0 Mw, distancia hipocentral 25 km, aceleración 0,22 g (0,55 g, considerando una desviación estándar).
3. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,0 Mw, distancia hipocentral 10 km, aceleración 0,52 g (1,34 g, considerando una desviación estándar).
4. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,0 Mw, distancia hipocentral 25 km, aceleración 0,22 g (0,55 g, considerando una desviación estándar).

Escenarios para sismos por subducción interplaca

5. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,2 Mw, distancia hipocentral 25 km, aceleración 0,80 g (1,80 g, considerando una desviación estándar).
6. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,2 Mw, distancia hipocentral 60 km, aceleración 0,26 g (0,59 g, considerando una desviación estándar).
7. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,2 Mw, distancia hipocentral 25 km, aceleración 0,80 g (1,80 g, considerando una desviación estándar).
8. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,2 Mw, distancia hipocentral 60 km, aceleración 0,26 g (0,59 g, considerando una desviación estándar).

Escenarios para sismos por subducción intraplaca

9. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,5 Mw, distancia hipocentral 60 km, aceleración 0,38 g (0,85 g, considerando una desviación estándar).
10. Nivel freático a 1 m, magnitud 7,5 Mw, distancia hipocentral 280 km, aceleración 0,05 g (0,12 g, considerando una desviación estándar).
11. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,5 Mw, distancia hipocentral 60 km, aceleración 0,38 g (0,85 g, considerando una desviación estándar).
12. Nivel freático a 5 m, magnitud 7,5 Mw, distancia hipocentral 280 km, aceleración 0,05 g (0,12 g, considerando una desviación estándar).

3.11 Evaluación de las potenciales manifestaciones en superficie para el escenario de análisis crítico

Se presenta a continuación un análisis de los resultados para el escenario considerado como crítico, correspondiente al número 5, el cual supone el nivel freático a 1 m de profundidad y que suceda un sismo de magnitud 7,2 Mw a una distancia hipocentral de 25 km, produciendo una aceleración media en la zona de estudio de 0,80 g.

Si bien el Código de Cimentaciones de Costa Rica define la zona de la ciudad de Jacó como susceptible a licuación, pudiéndose en un principio suponer que el potencial de licuación y sus posibles consecuencias pudieran ser las mismas para toda el área, los análisis realizados permiten determinar que no es así. Al contrario, los suelos con mayor potencial de licuación, asociados a valores de *LPI* altos, se concentran en una zona que corresponde a los suelos no consolidados atravesados por el Río Copey y la Quebrada Doña María, cuerpos de agua que corren a través de los barrios Copey, Camboya, Santa Lucía y Los Frijoles, asociados a los sondeos C-3, C-4, C-5, C-6, C-14, C-9 y C-7 y en los cuales se podría esperar licuación severa según los valores de *LPI* estimados. Precisamente, en esta zona, se ubican algunos centros de enseñanza primaria y secundaria, entre otra infraestructura primordial, los cuales se verían expuestos, en mayor grado, a potenciales daños producto de licuación de suelos, en caso de que utilicen sistemas de suelo- cimentación superficiales.

Existe otra zona correspondiente a barrios Pochotal y Los Cholos, donde los resultados de *LPI* obtenidos permiten concluir que el potencial de licuación es bajo. En esta zona, se ubica el centro de salud de la ciudad de Jacó y la estación local de Cruz Roja, organismo de primera respuesta ante una eventual emergencia. Entre ambas zonas, donde se ubican los barrios La Amistad y El Invu, según los valores de *LPI* estimados, se esperarían condiciones intermedias. En el barrio La Amistad, se ubica la estación de bomberos de la ciudad de Jacó, igualmente institución de primera respuesta ante una eventual emergencia. La Fig. 19 muestra la distribución de los valores de *LPI* obtenidos en la zona de estudio, siendo la zona azul la que presenta menores valores de *LPI* y las rojas los mayores, las verdes corresponden a zonas intermedias.

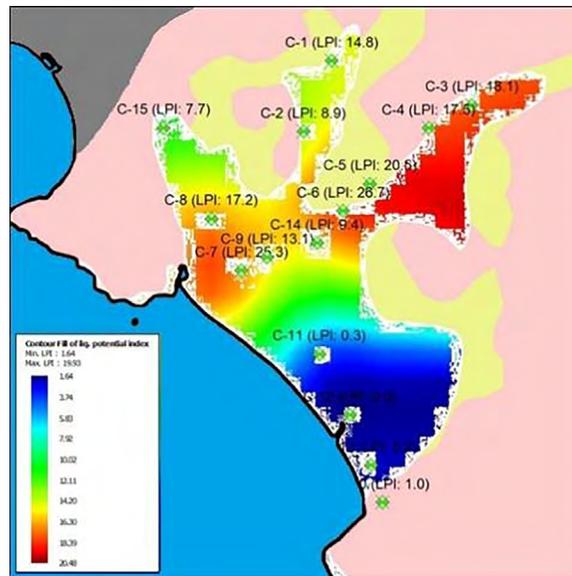


Fig. 19. Mapa de *LPI* para escenario 5 (aceleración media).

La Fig. 20 muestra un gráfico con los valores de *LPI* asociado a cada sondeo para el escenario de análisis 5.

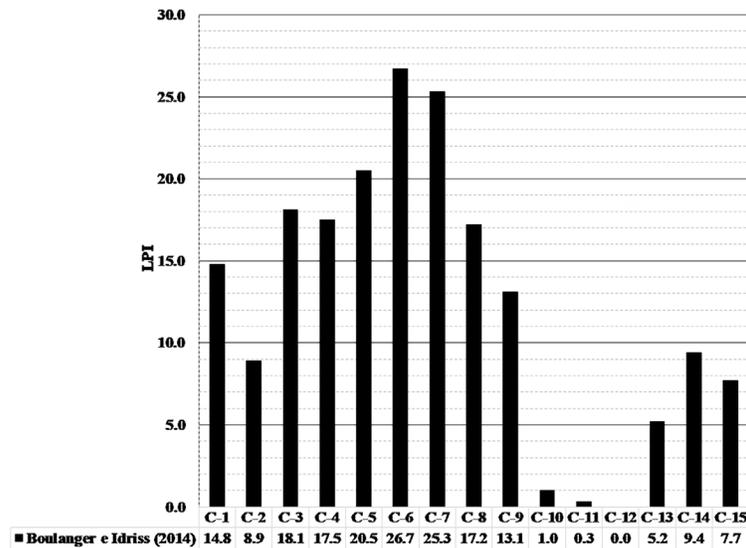


Fig. 20. Gráfico de *LPI* para escenario 5 (aceleración media).

La Fig. 21 muestra, por su parte, un gráfico con la variación de los valores de *LSN* para el escenario de análisis 5.

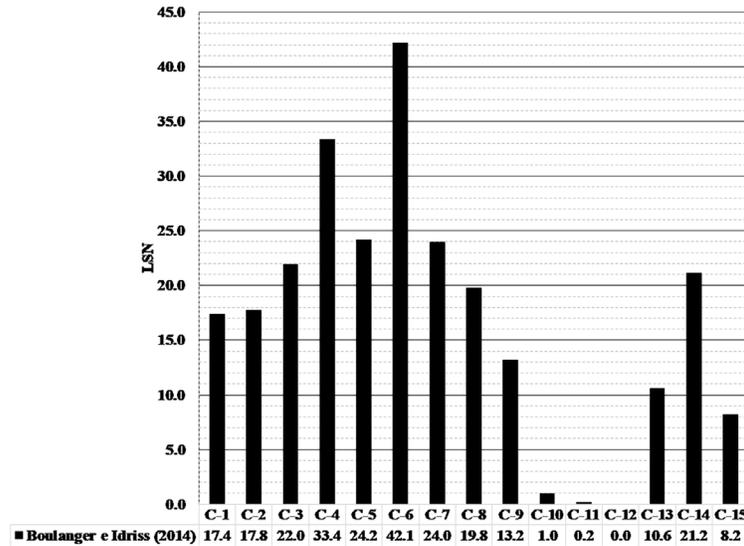


Fig. 21. Gráfico de LSN para escenario 5 (aceleración media).

De acuerdo con los niveles de desempeño que define la New Zealand Geotechnical Society [20], para la zona de terreno que abarca los sondeos C-3, C-4, C-5, C-6, C-14, C-9 y C-7, con valores de *LPI* entre 9,4 y 26,7 y valores de *LSN* entre 12 y 42, sería de esperar que se presenten daños moderados a severos, que podrían verse representados superficialmente por asentamientos desde los 10 cm a más de 20 cm. Esta categorización corresponde con la estimación de asentamientos realizados para los mismos sondeos, que va desde los 5 a 17 cm, según se muestra en la Fig. 22.

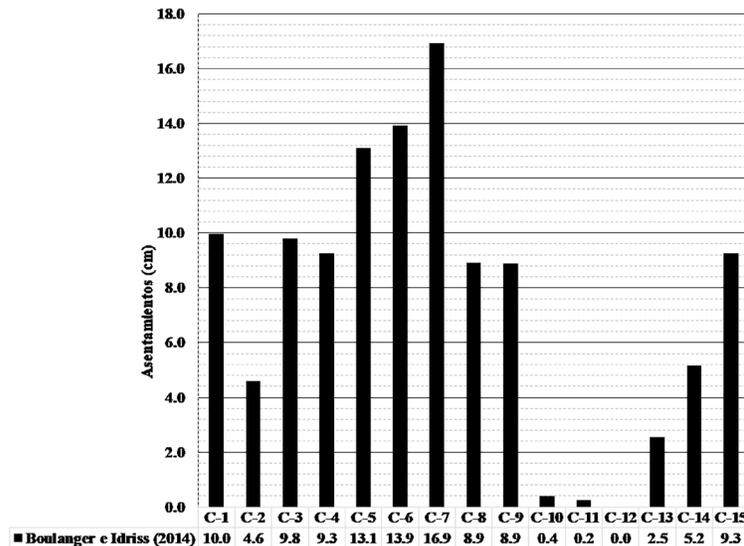


Fig. 22. Gráfico de asentamientos para escenario 5 (aceleración media).

Para la zona que abarca los sondeos C-10, C-13, C-12 y C-11, los valores de *LPI* y *LSN* permiten concluir que en este caso se esperarían daños leves o insignificantes, asociados a deformaciones despreciables del terreno y pequeños asentamientos. Esta misma condición se refleja en la estimación de asentamientos realizada, pues, para los sondeos C-10, C-11 y C-12,

los asentamientos estimados están por debajo de los 0,5 cm y, para el sondeo C-13, se estimaron en 2,5 cm, aproximadamente.

Por último, para la zona identificada como de potencial de daño intermedio, correspondiente a los sondeos C-1, C-2, C-8 y C-15, los valores estimados de *LPI* y *LSN* permiten determinar que para la zona de los sondeos C-1, C-2 y C-8 se podrían esperar daños altos, asociados a asentamientos en el rango de los 10 a 20 cm, mientras que, para la zona del sondeo C-15, se esperarían daños moderados. A partir de la estimación de los valores de asentamientos, los resultados del sondeo C-2 corresponden a un nivel de desempeño moderado, mientras que los sondeos C-1, C-8 y C-15 están asociados a un nivel de daño alto, con valores estimados de asentamientos entre 9 y 10 cm. Para el sondeo C-2, los asentamientos estimados son de casi 5 cm.

A pesar de estas últimas observaciones, se tiene que para la descripción que hace la New Zealand Geotechnical Society [13] sobre los niveles de desempeño esperado y para los valores de asentamientos estimados, existe una buena correlación entre estos resultados y podría usarse esta clasificación como base para una escala adaptada a las condiciones propias de la ciudad de Jacó, ajustando las consecuencias esperadas, en cuanto a asentamientos superficiales, a la escala de valores de *LPI* y *LSN* que hace esta institución.

Otro factor importante a evaluar ante los resultados obtenidos es el efecto del nivel freático. Esto permite también anticipar la variación en el potencial de licuación y posibles daños en superficie ante la ocurrencia de un sismo en época seca o en época lluviosa, y definir planes de respuesta en caso de que un sismo con características similares a las analizadas suceda con nivel freático somero o a mayor profundidad.

Se presenta en la Fig. 23 el mapa de *LPI* y en las Fig. 24 y 25 gráficos con los resultados *LPI* y *LSN* considerando el nivel freático, a 5 m de profundidad, considerando un sismo de 7,2 Mw y una aceleración de 0,80g, correspondiente con el escenario 7 analizado.

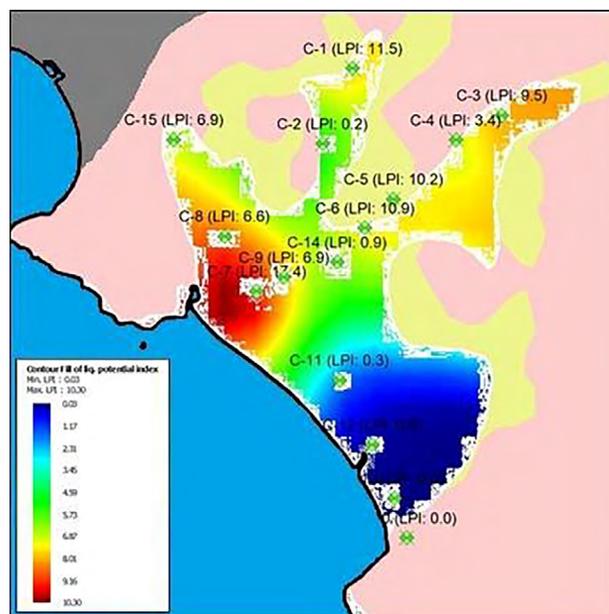


Fig. 23. Mapa de *LPI* para escenario 7 (aceleración media).

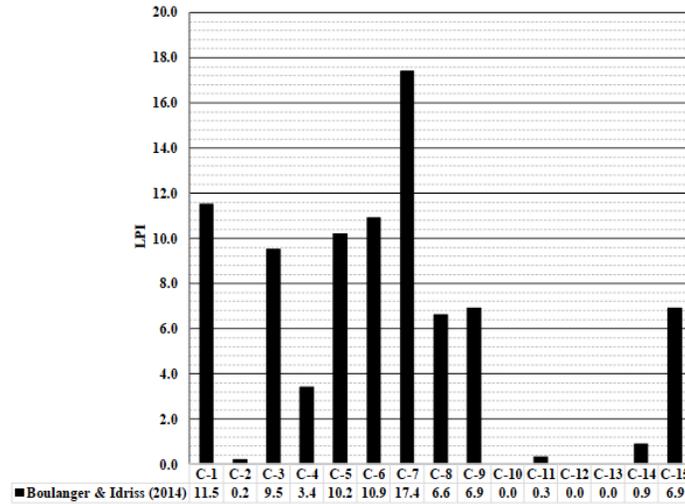


Fig. 24. Gráfico de *LPI* para escenario 7 (aceleración media).

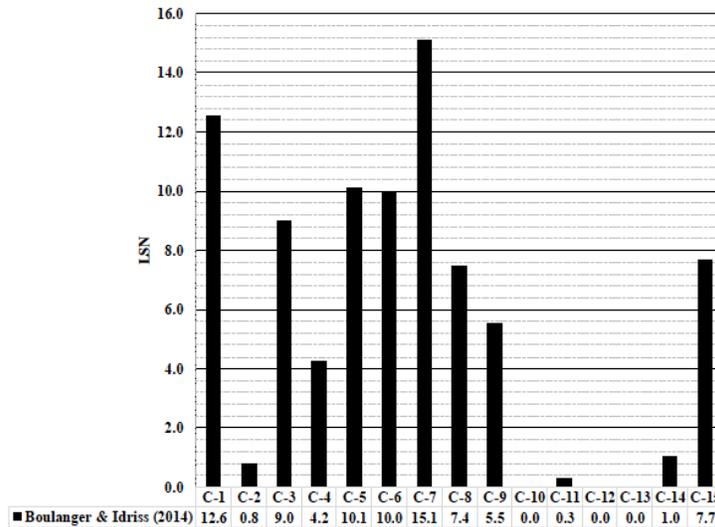


Fig. 25. Gráfico de *LSN* para escenario 7 (aceleración media).

Se observa que la zona identificada como de bajo potencial mantiene su comportamiento, mientras que la zona donde se esperaría mayor daño migra ahora hacia la zona del sondeo C-7, manteniendo, no obstante, un nivel de daño esperado alto. Sin embargo, para el resto de sondeos, el potencial daño esperado baja a leve (sondeo C-14) y a moderado.

Por tanto, la ocurrencia del sismo de análisis con niveles freáticos altos o bajos tiene implicancia en los potenciales daños que pudieran ocurrir y en las zonas donde sería esperable potenciales manifestaciones de licuación.

Se analizan ahora las condiciones estratigráficas del terreno y la interacción entre capas correspondientes a los resultados obtenidos. En cuanto a la zona de bajo potencial de licuación, correspondiente a los sondeos

C-10, C-11 y C-12, se identificaron suelos con comportamiento mecánico asociado a arcillas y arcillas limosas, suelos poco susceptibles a sufrir movilidad cíclica. Estos sondeos corresponden a la zona que atraviesan las quebradas Lisa y Seca para las cuales sería recomendable una mayor investigación con sondeos CPT y otros métodos que permitan obtener muestras para envío a laboratorio para confirmar las características de los suelos ensayados, revisar los resultados obtenidos en esta investigación y modificar el mapa de suelos susceptible a licuación, según corresponda.

Referente a la zona con alto potencial de licuación, para los sondeos ubicados en esta zona, se tiene de forma general una distribución en básicamente toda la profundidad de los sondeos de capas potencialmente licuables, que varían en espesor, pero distribuidas a lo largo de todo el sondeo. También, se observó la presencia de un estrato de espesor importante a profundidad potencialmente licuable, pero con capas superficiales, si bien de poco espesor, pero igualmente licuables. Para la primera condición, este comportamiento hace que la tendencia en los resultados de *LPI* y *LSN* sea similar, en cuanto a que se tiene una distribución en el perfil del terreno de muchas capas potencialmente licuables con una acumulación en todo el perfil de deformaciones volumétricas. Mientras que, para el segundo caso, se tiene una concentración en el perfil de capas potencialmente licuables con las deformaciones volumétricas concentradas en dichas capas, donde la acumulación de los asentamientos esperados se da en profundidad, lo cual podría mitigar las potenciales manifestaciones en superficie de la licuación.

Para el caso de las zonas con potencial intermedio, básicamente se tiene el segundo caso antes mencionado, donde las capas potencialmente licuables de suelo son de espesor importante pero concentradas en profundidad en el terreno o pocas y muy delgadas, pero ubicadas en superficie, según se muestra en la Fig. 26.

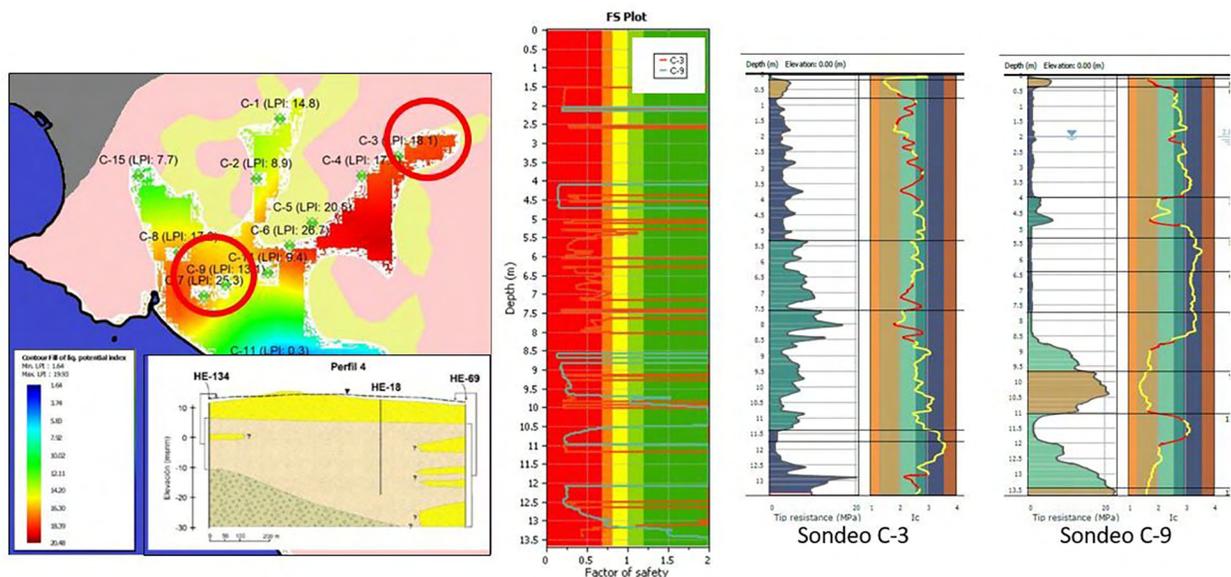


Fig. 26. Variación en la distribución de capas potencialmente licuables de acuerdo con estratigrafía identificada a partir de sondeos C-3 y C-9

4. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio permiten concluir que:

- 4.1 La zona analizada categorizada como de suelos susceptibles a licuación presenta una zona definida donde el potencial de licuación es muy bajo, con suelos con comportamiento mecánico asociados a arcillas y arcillas limosas. El resto de la zona muestra un comportamiento diferenciado, con zonas donde el potencial es mayor que en otras.
- 4.2 Esta variación en el potencial de licuación se puede asociar a virtuales daños y manifestaciones superficiales diferenciados por zona, según la amenaza sísmica representada en los análisis por medio de la magnitud de un sismo y las aceleraciones que este podría producir.
- 4.3 La identificación de zonas con mayor potencial de evidencia superficial de licuación, retratado así por medio de índices de severidad de licuación, permite priorizar las zonas a investigar con mayor detalle para el desarrollo de proyectos privados, de infraestructura pública y la ubicación de edificaciones primordiales como pudieran ser escuelas, gimnasios, clínicas, estaciones de bomberos, entre otros. Estas consideraciones deberían tomarse en cuenta para un plan regulador, aprovechando que hay zonas donde hay poca o nula infraestructura construida.
- 4.4 Se hace evidente la necesidad de realizar una investigación con un mayor alcance para la valoración del potencial de licuación y las posibles consecuencias (riesgo) sobre la infraestructura ya construida y su posible afectación en caso de presentarse un sismo con características similares a los analizados en este estudio. Esta valoración debería hacerse de forma independiente para la infraestructura que se evalúe, es decir, un análisis para líneas vitales, por ejemplo, otro para infraestructura habitacional o edificios de corta altura, otra para edificios de mayor altura, etc., tomando en consideración para estos últimos casos el sistema estructural, el material de construcción, el estado de la construcción, etc.
- 4.5 La ocurrencia de un sismo, si bien se podría considerar que produciría aceleraciones similares en toda la zona de estudio, tendría efectos muy distintos en diferentes partes según lo evaluado.
- 4.6 Los resultados obtenidos por medio de índices sirven de insumo para la generación de mapas y para la toma de decisiones en zonas específicas donde se esperarían mayores daños superficiales por licuación de suelos.
- 4.7 El potencial de licuación de un sitio no imposibilita la construcción de infraestructura, pero sí es un indicativo que el diseño y construcción de las obras que se contemplen deben ser adaptadas técnicamente a las condiciones potenciales de licuación. Esto podría requerir de una exigencia mayor en el alcance y cantidad de investigación geotécnica para zonas con mayor potencial de licuación, así como mayores inversiones para estos proyectos en su adaptación a las condiciones identificadas. En el caso de estructuras,

podría tratarse de cimentaciones profundas o sistemas de mejoramiento de suelos, los cuales, según su alcance, podrían representar una inversión importante para los proyectos que se planteen.

- 4.8 Se pueden caracterizar zonas particulares dentro del área analizada, donde las manifestaciones superficiales de licuación serían mayores respecto a otras zonas. Se recomienda implementar zonas de observación en las cuales sería potencialmente evidente a nivel superficial la ocurrencia de licuación. Estas zonas se deberían estudiar en mayor detalle y podrían ser usadas de base para la calibración de rangos de daño esperado ante un eventual sismo que produzca evidencia superficial de licuación.
- 4.9 Las estructuras enterradas, como líneas vitales (e.g. acueductos, gaseoductos) son predominantemente afectadas por la deformación del suelo circundante. Es importante identificar las zonas críticas de este tipo de infraestructura y ubicarlas respecto a los mapas generados para tomar las acciones de reforzamiento necesarios para que no fallen en caso de emergencia, o bien construir sistemas con redundancia que no detengan su funcionamiento en caso de que se presente licuación en un grado tal que dañe partes de estos sistemas.
- 4.10 Los índices de severidad de licuación discutidos pueden proporcionar una indicación de la gravedad de un problema de asentamiento inducido por licuación, pero requerirán ajustarse a partir de casos de ocurrencia de licuación apegadas a las condiciones propias de la zona de estudio.

ROLES DE AUTORES

Diego Cordero-Carballo: Conceptualización, curación de datos, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, validación, visualización, redacción – borrador original.

Gonzalo Montalva-Alvarado: Conceptualización, metodología, supervisión, redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Costarricense de Geotecnia, *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2009, p.190.
- [2] Red Sismológica Nacional, “Terremoto de Limón, 22 de abril de 1991 (en línea)”. <https://rsn.ucr.ac.cr/component/content/article/26-sismologia/sismos-historicos/3235-terremoto-de-limon-22-de-abril-de-1991?Itemid=225>. (accesado en Ago. 22, 2021).
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, “Estadísticas demográficas 2011-2025 (en línea)”. <https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion> (accesado en Ago. 22, 2021).
- [4] The National Academies of Sciences, *Engineering and Medicine, State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. Washington, DC., EEUU: The National Academies Press, 2016, p. 286.

- [5] Ministry of Business, Innovation & Employment, *Planning and engineering guidance for potentially liquefaction-prone land*. Wellington, Nueva Zelanda: Ministry of Business, Innovation & Employment, 2017, p. 142.
- [6] K. Ishihara, "Stability of natural deposits during earthquakes", en *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985, pp. 321-376.
- [7] S. van Ballegooy, R. Green, J. Lees, F. Wentz y B. Maurer. "Assessment of various CPT based liquefaction severity index frameworks relative to the Ishihara (1985) H_1 - H_2 boundary curves", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, no. 79, pp. 347-364, 2015.
- [8] T. Iwasaki, F. Tatsuoka, K. Tokida y S. Yasuda. "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", *Proceedings of the 2nd International Conference on Micro zonation*, 1978, pp. 885-896.
- [9] B. Maurer, R. Green y O. Taylor. "Moving towards an improved index of assessing liquefaction hazard: lessons from historical data", *Soils and foundations*, no. 55, pp. 778 - 787, 2015.
- [10] S. van Ballegooy, P. Malan, M. Jacka, V. Lacrosse, J. Leeves y J. Lyth. "Methods for characterizing effects of liquefaction in terms of damage severity", presentado en *15th World Conference on Earthquake Engineering Lisboa*, Portugal, 2012.
- [11] K. Ishihara y M. Yoshimine, "Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes", *Soil and foundations*, no. 32, pp. 173-188, 1992.
- [12] G. Zhang, P. Robertson y R. Brachman. "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", *Canadian Geotechnical Journal*, no. 39, pp.1168-1180, 2002.
- [13] New Zealand Geotechnical Society, *Earthquake geotechnical engineering practice Module 3: Identification, assessment and mitigation of liquefaction hazards*. Wellington, Nueva Zelanda: NZGS, 2016, p. 40.
- [14] R. Boulanger. y M. Idriss. *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. California, Estados Unidos: University of California at Davis, 2014, p. 134.
- [15] Google Maps. "Mapa de Jacó, Puntarenas". [googlemaps.com. https://www.google.com/maps/place/Provincia+de+Puntarenas,+Jac%C3%B3/@9.6158125,-84.6436073,14z/data=!3m1!4m6!3m5!1s0x8fa1c76ab9610c83:0x1bf37effa58fddf6!8m2!3d9.6202396!4d-84.6217487!16zL20vMGdnMHN2](https://www.google.com/maps/place/Provincia+de+Puntarenas,+Jac%C3%B3/@9.6158125,-84.6436073,14z/data=!3m1!4m6!3m5!1s0x8fa1c76ab9610c83:0x1bf37effa58fddf6!8m2!3d9.6202396!4d-84.6217487!16zL20vMGdnMHN2). (accesado en Feb. 22, 2023).
- [16] A. Gomez, H. Madrigal, C. Nuñez, H. Calderón y P. Jiménez. "Vulnerabilidad hidrogeológica en la zona costera de Jacó, Pacífico Central, Costa Rica", *Revista Geográfica de América Central*, no. 63, pp. 141-163, 2019.
- [17] Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias de Costa Rica, "Mapa de amenazas naturales potenciales cantón Garabito (en línea)". https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/puntarenas.aspx (accesado en Ago. 22, 2021).
- [18] Red Sismológica Nacional, "Informe preliminar sismo de Jacó 12 de noviembre de 2017 (en línea)." <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>. (accesado en Ago. 22, 2021).
- [19] Red Sismológica Nacional, "Informe preliminar sismo de Jacó 24 de agosto de 2020 (en línea)." <https://rsn.ucr.ac.cr/actividad-sismica/sismos-historicos>. (accesado en Ago. 22, 2021).
- [20] R. Bogantes, G. Laporte, y C. Quesada. "Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos", presentado en *VIII Seminario Nacional de Geotecnia y III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas*, San José, Costa Rica, 2002, pp. 159-181.

- [21] Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Estación PJAC (en línea)”. <http://lis.ucr.ac.cr/1556> (accesado en Ago. 22, 2021).
- [22] A. Climent, W. Rojas, G. Alvarado y B. Benito. *Proyecto Resis II Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. San José, Costa Rica: 2008. 116 p.
- [23] P. Denyer, W. Montero y G. Alvarado. *Atlas tectónico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Editorial UCR, 2009, p. 55.
- [24] Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Falla Herradura (en línea)”. <http://www.lis.ucr.ac.cr/845> (accesado en Ago. 22, 2021).
- [25] Laboratorio de Ingeniería Sísmica, “Falla Tárcoles (en línea)”. <http://www.lis.ucr.ac.cr/302> (accesado en Ago. 22, 2021).
- [26] Google Earth Pro. “Mapa de Jacó, Puntarenas”. (accesado en Feb. 22, 2023).
- [27] V. Schmidt, “Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010”, *Revista Geológica de América Central*, no. 50, pp. 7-37, 2014.