



XVIII Congreso Peruano de Geología

Análisis del potencial de licuación en los suelos del distrito de San Vicente de Cañete a partir de la velocidad de ondas de corte - resultados preliminares

Kelly Pari¹, Isabel Bernal¹, Juan Carlos Gómez², Hernando Tavera³

¹ Unidad de Ingeniería Sísmica, Instituto Geofísico del Perú (kpari@igp.gob.pe)

² Unidad de Geodinámica, Instituto Geofísico del Perú

³ Director de la subdirección de ciencias de la tierra sólida, Instituto Geofísico del Perú.

Resumen

Se analiza el peligro de licuación de suelos en el distrito de San Vicente de Cañete aplicando los resultados de métodos indirectos como los basados en el Análisis de Ondas de Corte (Vs). Para el cálculo del potencial de licuación, se sigue la metodología propuesta por Andrus y Stokoe (2000) y se considera como parámetros de entrada, la profundidad del nivel freático, la velocidad de las ondas de corte y la magnitud de un sismo de diseño. Del análisis, se concluye que los suelos de la Asoc. de Vivienda Las Salinas, AA. HH. 28 de Julio, Urb. San Luis, Hualcará y San Leonardo son los más propensos a licuar en caso de sismos de mediana a alta magnitud. Los resultados son consistentes con evidencias históricas de sismos pasados donde se observaron efectos de licuación.

1. Introducción

El fenómeno de licuación es definido como la pérdida rápida de la resistencia al esfuerzo cortante de suelos saturados debido al incremento súbito en las presiones de poros bajo condiciones no drenadas ante la acción de cargas dinámicas. La ocurrencia de este fenómeno genera grietas en pavimentos, desprendimientos laterales, falla de taludes e incluso el colapso de cualquier estructura cimentada sobre el suelo licuable.

Existe evidencia histórica que en distritos como San Vicente de Cañete, ubicado a 144 km al sur de Lima, han ocurrido fenómenos locales de licuación de suelos a raíz de los sismos ocurridos el 28 de mayo de 1948 con 7.0 Ms (Silgado, 1978) y el 03 de octubre de 1974 con 7.5 Ms (Huaco et al, 1975) con intensidades de VIII en la zona de

estudio, se observaron grietas, pequeños derrumbes y la formación de conos de arena principalmente en los extremos SO y E de la ciudad de San Vicente de Cañete, que en la actualidad se encuentran ocupados por nuevas urbanizaciones.

Existen estudios de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación en San Vicente de Cañete (PENUD), este informe identifica sectores críticos mediante la estimación de niveles de riesgo, también hace una evaluación de los daños locales causados por el sismo de 15.08.2007, lo ocurrido en esta ciudad demuestra la necesidad de conocer mejor los suelos en los que se va a construir.

Actualmente, la zona no cuenta con estudios de zonificación de suelos referidos al potencial de licuación; por lo tanto, no se conoce el real peligro al cual están sometidas las edificaciones/ viviendas construidas sobre estos suelos, incrementando su vulnerabilidad ante la ocurrencia de los sismos.

Además, el distrito de San Vicente de Cañete presenta altos niveles de crecimiento demográfico ocupando suelos favorables para licuar. Se analiza el potencial de licuación de sus suelos mediante la aplicación de métodos de Análisis de Ondas de Corte (Vs) y de ensayos de penetración directa - DPL. Para esta aproximación del potencial de licuación, se sigue la metodología propuesta por Andrus y Stokoe (2000), desarrollado de manera empírica en otras latitudes.

2. Metodología de evaluación del potencial de licuación

El planteamiento más utilizado para la evaluación del potencial de licuación es el criterio determinístico del factor de seguridad basado en la comparación de esfuerzos cíclicos inducidos por sismos (CSR) y la resistencia cíclica del suelo (CRR), de donde se obtendrá el factor de seguridad contra el fenómeno de licuación:

$$FS = \frac{CSR}{CRR}$$

El CSR se estima aplicando métodos simplificados como el propuesto por Seed e Idriss (1971), quienes utilizaron la analogía del bloque rígido para proponer una expresión que determine la resistencia al esfuerzo cíclico (CSR) a una profundidad determinada durante un sismo, lo cual depende de la aceleración máxima que se desarrolle en el suelo (a_{max}), el esfuerzo total y efectivo vertical (σ_0 y σ_0') y un factor de reducción de esfuerzo (r_d) que decrece con la profundidad.

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma_0'} = 0.65 * \frac{a_{max}}{g} * \frac{\sigma_0}{\sigma_0'} * r_d$$

El CRR se estima aplicando ensayos, ya sea de laboratorio o in-situ. Inicialmente la resistencia dinámica del suelo se calculaba haciendo uso de ensayos de laboratorio, que debido a su alto costo y limitantes, en la actualidad la tendencia es a realizar ensayos de campo (Kramer, 1996). Esta metodología, desarrollada por Andrus y Stokoe (2000), se basa en realizar ensayos sísmicos de refracción, donde la velocidad de las ondas de corte (V_s) se corrige con la sobrepresión, usando la ecuación (Robertson et al., 1992). Finalmente, CRR se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CRR = 0.022 * \left(\frac{K_c * V_{s1}}{100} \right)^2 + 2.8 * \left(\frac{1}{V_{s1c} - K_c * V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1c}} \right) * MSF$$

Dónde:

- ✓ $MSF = \left(\frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56}$ siendo M_w la magnitud del sismo de diseño
- ✓ $V_{s1} = V_s * \left(\frac{P_a}{\sigma_v'} \right)^{0.25}$ siendo V_s la velocidad de ondas de corte corregida en m/seg, P_a es un esfuerzo referencial que generalmente es 100 Kpa y σ_v' es el esfuerzo de confinamiento efectivo.
- ✓ K_c es un factor de corrección que cuantifica los efectos de cementación y del tiempo de sedimentación de los depósitos que se considera como 1 dada la falta de métodos para estimarlo de manera confiable.
- ✓ $(V_{s1})_{cs}$ = Es el porcentaje del contenido de finos (% FC)

La mayor ventaja de usar V_s , se debe a que es posible conocer la velocidad de ondas de corte en lugares donde es difícil obtener información con ensayos SPT o ensayos de penetrómetro de cono (CPT), en suelos gravosos, o en lugares donde las perforaciones no son permitidas. Las V_s medidas en campo son directamente proporcionales al módulo cortante en el intervalo de pequeñas

deformaciones y aumentan con la densidad de manera similar a la resistencia a la licuación. Esta correlación directa permite determinar conceptualmente la posibilidad de usar la velocidad de las ondas de corte como parámetro de medida de la resistencia a la licuación de un estrato de suelo (Towhata, 2008).

2.1. Datos

A fin de aplicar la metodología descrita se requiere la siguiente información:

- ✓ Recopilar información referida a la geología, geomorfología, geotecnia y datos históricos de ocurrencia de licuación, para contrastar con los resultados obtenidos.
- ✓ Conocer la Velocidad de Ondas de Corte (V_s), para lo cual se utilizará los perfiles de velocidad obtenidos con el Método de Análisis Multicanal (MASW) de 12 líneas sísmicas (profundidad de resolución 30 metros) distribuidas según la Figura 1. Esta información será utilizada en las correlaciones empíricas propuestas por Andrus y Stokoe (2000).
- ✓ Mediante el software aplicativo LiqIT v.4.7 (Liquefaction analysis software), se realizará la simulación considerando dos escenarios: El primero, considera un sismo probable de 5.0 Mw y el segundo de 6.0 Mw, con aceleraciones máximas horizontal de 0.40 g y 0.45 g de acuerdo a la Norma E-030, (Zona 4, distrito de San Vicente de Cañete). Por lo que un evento sísmico de magnitud mayor a los evaluados provocara el fenómeno de licuación en las zonas identificadas.
- ✓ Se considera los resultados de la evaluación del potencial de licuación utilizando el número de golpes del ensayo de penetración dinámica ligera (DPL). En campo se realizó 7 ensayos obteniéndose valores de N10.
- ✓ Además, se obtiene información de 7 calicatas, de las cuales se extrajeron muestras de suelo con el fin de realizar ensayos geotécnicos como: granulometría, plasticidad, corte directo y el cálculo de la capacidad portante de los suelos.

Cuadro 1: Clasificación de los suelos de las siete calicatas según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.75 mm)	ARENAS % (>0.075 mm, <4.75 mm)	FINOS % (<0.075 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
C-01	2.4	N.P.	1.5	60.8	28.06	23	16	7	5.17	SM	Arena limosa con gravas
C-02	0.8	0.80	—	47.4	52.56	44	28	16	27.05	CL	Arcilla limosa, arenosa
C-03	2.2	N.P.	5.1	61.7	33.23	33	24	9	10.79	SM	Arena limosa con gravas
C-04	3.2	N.P.	—	55	45	24	16	8	5.8	SM	Arena limosa
C-05	3.3	N.P.	8	52	40	25	17	8	6.5	SM	Arena limosa con gravas
C-06	2.2	2.20	70	27	3	26	19	7	9.2	GW	Grava graduada arenosa
C-07	3.0	N.P.	—	25	75	38	24	14	18.5	CL	Arcilla limosa, arenosa

Fuente: UNALM e IGP (2015). Dónde: N.P.=No presenta

- ✓ Finalmente, se considera la profundidad del nivel freático obtenido de 6 líneas de tomografía eléctrica. Con líneas de 290m, separación de electrodos de 10m y 10 niveles de toma de datos.

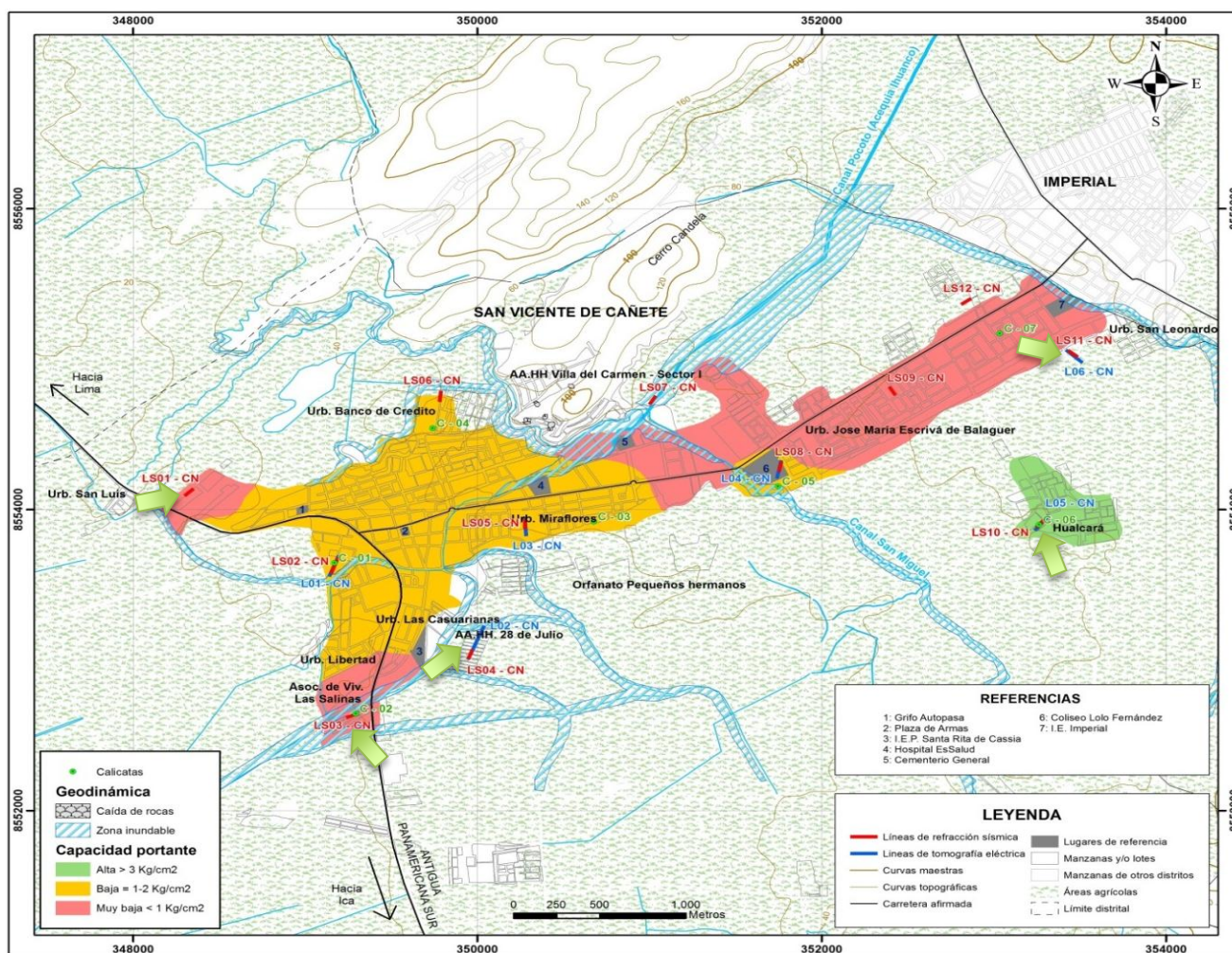


Figura 1: Mapa preliminar de capacidad portante de los suelos (para una cimentación cuadrada unitaria) en el área urbana de San Vicente de Cañete, ubicación de los ensayos de refracción sísmica, tomografía eléctrica y calicatas. Las flechas indican las zonas con potencial de desarrollar el fenómeno de licuación. Fuente IGP.

3. Análisis del potencial de licuación en San Vicente de Cañete

El análisis de la información obtenida en 12 líneas sísmicas (LS01-CN,..., LS12-CN) con la técnica MASW, permite identificar la presencia de dos capas de suelo, la más superficial con velocidades entre 100 y 185 m/s y espesores de hasta 4 m. La segunda capa con velocidades que entre 190 y 350 m/s y espesores de 3 a 16 m. La superficie de contacto presenta velocidades > de 500 m/s.

Aplicando la metodología propuesta por Andrus y Stokoe (2000), se observa que en LS10-CN, la probabilidad de licuación se da a 2.0 metros de profundidad, considerando un Factor de seguridad de 1, a partir de un CSR=0.29 y el CRR=0.11.

En las líneas sísmicas LS03-CN L3 y LS04-CN, la probabilidad de licuación se da desde los 2 a 5m de profundidad donde el CSR en promedio es 0.50 y el CRR=0.10. En el caso de las líneas sísmicas LS11-CN y LS01-CN la probabilidad de licuación la obtuvimos a profundidades de 2 - 6 y 7 m respectivamente.

4. Resultados

Los resultados basados en Ondas de Corte (V_s), siguiendo la metodología de análisis propuesta por Andrus y Stokoe (2000) y considerando dos escenarios, se identificaron cinco zonas con potencial a desarrollar licuación (Figura 1).

- **Escenario 1:** Al considerar un sismo con magnitud de 5.0 Mw, los suelos de la Asoc. de Viv. Las Salinas y el AA.HH 28 de Julio, presentarían mayor potencial de licuación.
- **Escenario 2:** Al considerar un sismo con magnitud de 6.0 Mw, los suelos de la Urb. San Luis, San Leonardo y Hualcará, presentarían mayor potencial de licuación. Como también las zonas del escenario 1.

Asimismo, los resultados basados en DPL, permiten concluir que los suelos de la Asociación de Viviendas Las Salinas y Hualcará, presentarían potencial de licuación, a niveles superficiales. Estos resultados, evidencian que los métodos basados en las Ondas de Corte y DPL, son complementarios entre sí, ya que con el análisis de la velocidad de ondas de corte se explora mayores profundidades y diferentes escenarios que permiten delimitar las zonas con potencial licuable.

Finalmente, los resultados obtenidos en este estudio se correlacionan, hacia el extremo SO y E del área de estudio, con los valores bajos de resistividad (<20 ohm.m) del suelo obtenidos hasta los 5 y 10 metros de profundidad lo que muestra la presencia de nivel freático superficial y los valores bajos de capacidad admisible (<1.0gr/cm²), evidenciando la presencia de suelos de baja densidad y poco consolidados A diferencia de lo observado en la zona céntrica del distrito y extremo Norte (sobre el cerro candela), donde los suelos están mejor consolidados.

5. Conclusiones y Recomendaciones

- ✓ Mediante la distribución de valores de Vs, se determinó que existen zonas con potencial a desarrollar el fenómeno de licuación en el distrito de San Vicente de Cañete. Las Asoc. de Viv. Las Salinas, Hualcará, 28 de Julio, San Luis y San Leonardo. Las dos primeras son consistentes por los métodos directos (DPL). Lo que indica que los métodos indirectos basados en la velocidad de las ondas de corte son una buena opción para calcular el potencial de licuación en grandes áreas urbanas ya que resultan más eficientes.
- ✓ Se recomienda realizar sondajes eléctricos verticales (SEVs) para tener un mejor conocimiento de la profundidad del nivel freático.
- ✓ Se recomienda tener presente la profundidad del nivel freático para futuras construcciones, así preservar a las estructuras de daños graves en caso de un evento sísmico, ya que pueden existir suelos residuales susceptibles a la licuación.
- ✓ Los ensayos geofísicos deben ser complementados con métodos de exploración directa ya que es posible que se obtengan valores de resistencia a la licuación bajos utilizando el método basado en ondas de corte en depósitos arcillosos o limosos de alta plasticidad en los cuales la licuación no ocurre debido a sus características impermeables.
- ✓ Se recomienda realizar un mayor número de líneas sísmicas en toda el área de estudio, para así poder realizar contornos de profundidades probables de licuación.

- ✓ En el estudio sólo se consideró el potencial de licuación basado en el factor de seguridad, pero no se estimó la probabilidad de daños que podrían generar (PL). Se recomienda calcular este parámetro para futuras investigaciones pues es importante conocer el impacto que podría tener un estrato licuable en las cimentaciones de las edificaciones de la zona que en su mayoría serán superficiales debido a las buenas condiciones físicas de los suelos de la zona.

Agradecimientos

Agradecer al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por los datos proporcionados.

Referencias

- Andrus R.D. and Stokoe K.H. (2000): Liquefaction Resistance Based on Shear-Wave Velocity, J. Geotech. Engg. Div., ASCE. (126)11:1015-1025.
- Huaco, D., Huaco, P. y Espejo, G. (1975), Comportamiento del Suelo de Cañete Asociado al Sismo del 3 de Octubre de 1974, Reunión Andina de Seguridad Sísmica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Kramer S.L. (1996): Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 653 P.
- Lingwanda, M. I., Larsson, S. and Nyaoro, D. L. (2014). Correlations of SPT, CPT and DPL data for sandy soil in Tanzania. Geotechnical and Geological Engineering.
- Norma E-30 (2016): Norma de diseño sismorresistente E030. Ministerio de vivienda construcción y saneamiento.
- Seed H.B., Idriss I.M., and Arango I. (1971): Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, J. Geotechnical Engg., ASCE, 109 (3)458-482.
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú.