



GEO-
INSTITUTE



6.º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CIMENTACIONES PROFUNDAS
Y MEJORAMIENTO DE SUELOS

Octubre 19-20, 2023 – CDMX, México



Mejoramiento de suelos mediante elementos X1[®] de desplazamiento para mitigación de licuación en tres proyectos, ubicados en la línea costera de Riviera de Nayarit, Jalisco, y Veracruz

Soil improvement using X1[®] displacement system to reduce liquefaction potential in three projects located on the coastline of Riviera de Nayarit, Jalisco, and Veracruz.

José Luis AGUIRRE¹, Jorge ARROYO², Luis Ricardo SAUCEDO³

¹Soilsolution, Guadalajara, Jalisco, México

²GEOPIER una división de CMC, México

³Soilsolution, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

RESUMEN: Este documento describe la metodología de análisis, construcción y resultados de densificación, del mejoramiento de suelos basado en el sistema de Agregado Compactado X1[®] de desplazamiento, para dos desarrollos residenciales ubicados en la línea costera de la Riviera Nayarit y Jalisco, y para una estación de compresión de gas en Veracruz. Uno de los principales riesgos geotécnicos en esas zonas de México es el fenómeno de licuación de suelos, el cual genera la pérdida de resistencia del terreno durante la acción de un sismo. Por lo tanto, se optó por utilizar el sistema de mejoramiento de suelos X1[®] de desplazamiento el para densificar los suelos arenosos de compacidades sueltas a medias, y así reducir el potencial de licuación del sitio. El resultado de densificación debido a la instalación de elementos X1[®] de desplazamiento fue medido mediante ensayos de Penetración Estándar (SPT) y Piezoconos (CPT), para validar la eficiencia del sistema. Se obtuvieron incrementos de resistencia del suelo de 2.3 veces las condiciones de resistencia iniciales (*in-situ*), lo cual ayudó a validar la reducción del potencial de licuación del sitio mediante los análisis correspondientes.

ABSTRACT: This document describes the design methodology, construction process, and soil densification results, of a soil improvement performed with the X1[®] displacement system for two residential developments located on the coastline of the Nayarit Riviera and Jalisco, and one gas compressor station in Veracruz. One of the main geotechnical hazards in these areas of Mexico is soil liquefaction, which may generate a loss of soil strength during a seismic event. Therefore, displacement X1[®] system was implemented to densify loose to medium dense sandy soils, thus reducing the risk of liquefaction potential. The gain in soil strength due to the installation of the displacement X1[®] system was monitored by SPT and CPT tests, verifying the efficiency of the system; The gain in soil strength was about 2.3 times the *in-situ* conditions. The reduction of liquefaction risk due to the soil improvement was then validated conducting the corresponding analyses.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Fenómeno de licuación

En México se registran más de 90 sismos por año, siendo algunos de ellos de gran magnitud (superiores a 7 grados en la escala Richter), afectando principalmente los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Oaxaca, Estado de México, Chiapas, entre otros (Organización Panamericana de la Salud, 1985). En las líneas costeras de México es común que se presente el riesgo de licuación de suelos, al existir un ambiente geomorfológico y tectónico que propicia su desencadenamiento, ocasionando daños severos tanto geotécnicos como estructurales. Esto se evidenció después de diferentes sismos en los estados de Jalisco en 1995 (Lazcano, 2001), Baja California en 2010 (Rangel et al., 2010) y Veracruz en 2017 (Guzmán et al., 2020) Los tres eventos

mencionados se encuentran en zonas de alto riesgo sísmico, y comparten condiciones estratigráficas similares en los sitios donde hubo evidencia de licuación de suelos: arenas de baja compacidad, bajo contenido de finos, y presencia de nivel freático superficial.

1.2 Elementos X1[®] de desplazamiento como alternativa a sistemas densificación

Uno de los mecanismos más usados para reducir el riesgo de licuación en arenas con bajo contenido de finos, es mediante su densificación por medios mecánicos. Las Pilas de Agregado Compactado[®] a base de grava han demostrado ser un sistema efectivo respecto a otras soluciones tradicionales de mejoramiento de suelos (Van Ballegooy et. al, 2015).

El sistema X1® de desplazamiento presenta la versatilidad de utilizar grava o arena del sitio para generar un desplazamiento lateral mediante el hincado de la herramienta, generando una expansión de cavidad que densifica radialmente el suelo matriz. Este sistema es diseñado para densificar arenas de compacidad suelta a media con bajo contenido de finos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Densificación de suelos con elementos X1® de desplazamiento

El sistema de mejoramiento de suelos X1® de desplazamiento es un sistema para densificación de arenas con bajo contenido de finos (<12%) que induce una densificación vertical y radial por medio de un martillo vibro-compactador especializado que va unido a una herramienta apisonadora en el fondo. El efecto de densificación proporciona un incremento sustancial en la densidad relativa del terreno.

El proceso constructivo del sistema de desplazamiento X1® consiste en los siguientes pasos:

1. La herramienta compactadora se hincará en el suelo hasta la profundidad de diseño con fuerza de empuje impuesta por la energía hidráulica de la máquina y mástil, así como vibración provista por el martillo vibro-hincador de gran momento variable.
2. Se depositará arena con bajo contenido de finos proveniente del sitio por encima de la herramienta de compactación, con la finalidad de rellenar los huecos o conos superiores generados por el desplazamiento y compactación del material.
3. El equipo se elevará a un ritmo constante para permitir el flujo de la arena dentro de la cavidad.
4. El equipo se hincará nuevamente con un empuje y una alta energía de impacto en sentido vertical, esta última provista por el martillo vibro-hincador, con el fin de compactar el material existente hasta obtener una capa de arena compactada.
5. Los procedimientos anteriores se repetirán hasta llegar a la superficie, dando como resultado un Elemento X1® de desplazamiento de alta densidad, y en el proceso, se densificará al suelo circundante por el desplazamiento lateral que se produce durante su compactación, Figura 1.

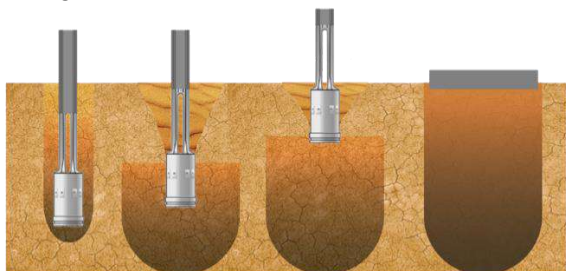


Figura 1. Esquema de proceso constructivo del sistema X1® de desplazamiento con arenas del sitio

2.2 Análisis de susceptibilidad de licuación

El potencial de licuación es evaluado comúnmente mediante las metodologías empíricas simplificadas determinísticas descritas en Idriss & Boulanger (2008, 2014) y otras. Siguiendo esas guías de diseño se obtiene un Factor de Seguridad contra licuación (FS_{Liq}), en el cual, se compara el esfuerzo cortante aplicado a una masa de suelo durante un evento sísmico (CSR), mediante la expresión simplificada por Seed e Idriss (1971), y la resistencia al corte de la masa de suelo contra los esfuerzos cíclicos de corte (CRR):

$$FS_{Liq} = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

La estimación de factores de seguridad para evaluar el riesgo de licuación se ha vuelto una práctica común en la cual se busca que el mejoramiento del suelo incremente la resistencia del suelo hasta alcanzar un rango satisfactorio de $FS_{Liq} \geq 1$. Sin embargo, adoptar únicamente este criterio puede llevar a un diseño conservador (Franke and Olson, 2021) y a su vez, una propuesta robusta de mejoramiento de suelos. El uso de indicadores de riesgo que evalúan el potencial de licuación en términos de diseño basado en desempeño, son una herramienta adicional para la optimización de las alternativas de mejoramiento de suelos.

Marcos de riesgo tales como Índices de Potencial de Licuación (LPI), Numero de Severidad de Licuación (LSN), Asentamientos Post-licuación y el criterio de la Costra No Licuable, son indicadores que pueden contribuir a la optimización de profundidades de mejoramiento de suelos como se describe más adelante.

2.3 Índice de Potencial de Licuación LPI

El Índice de Potencial de Licuación (LPI) estima la gravedad del potencial de licuación y predice las manifestaciones superficiales, el daño por licuación, o el potencial de falla de un área propensa a la licuación. El LPI en un sitio se calcula integrando los factores de seguridad (FS_L) a lo largo de la columna de suelo hasta un máximo de 20 m de profundidad. Además, se agrega una función de ponderación para dar más peso a las capas cercanas a la superficie del suelo. El índice de potencial de licuación (LPI) propuesto originalmente por Iwasaki et al. (1978, 1982) se expresa de la siguiente manera:

$$LPI = \int_0^{20} Fw(z)dz \quad (2)$$

donde $F = 1 - FS_{Liq}$ para $FS_{Liq} < 1$ y $F = 0$ para $FS_{Liq} > 1$; $w(z)$ es una función de ponderación dada por $w(z) = 10 - 0.5z$ para $z < 20$ m y $w(z) = 0$ para $z > 20$ m; y z es la profundidad en metros por debajo de la superficie del suelo. Por lo tanto, se supone que la severidad de la manifestación de licuación es proporcional al espesor de una capa licuada, la proximidad de la capa a la superficie del suelo y la cantidad por la cual FS_{Liq}

es menor que 1.0. Dada esta definición, LPI puede variar de 0 a un máximo de 100, como se muestra en la Tabla 1 (Iwasaki et al.; 1982).

Tabla 1. Severidad de licuación evaluada a partir del Índice de Potencial de Licuación (Iwasaki et al.; 1982).

LPI	Potencial de Licuación
LPI=0	Muy bajo
0<LPI<5	Bajo
5<LPI<15	Alto
15<LPI	Muy alto

2.4 Número de Severidad de Licuación LSN

Al igual que el Índice de Potencial de Licuación (LPI) el Número de Severidad de Licuación (LSN) es un índice que se desarrolló siguiendo las observaciones de daños por inducidos por licuación de la Secuencia de Terremotos de Canterbury (CES) (Van Ballegooy et al, 2014) para reflejar los efectos dañinos de la licuación superficial en terrenos residenciales y cimentaciones. El parámetro de LSN se define por la siguiente ecuación.

$$LSN = 1000 \int \frac{\varepsilon_v}{z} dz \quad (3)$$

donde ε_v es la deformación volumétrica calculada en la capa en cuestión se expresa en porcentaje (p. ej., 3% = 0.03), y z es la profundidad de la capa de interés en metros por debajo de la superficie de suelo.

En la Tabla 2 se resume el criterio y los rangos de LSN para evaluar el potencial de licuación.

Tabla 2. Potencial de licuación según el valor de LSN (Van Ballegooy et al, 2014)

LSN	Potencial de Licuación
0≤LSN≤10	Poco o nula
10<LSN≤20	Baja
20<LSN≤30	Moderada
30<LSN≤40	Moderada a severa
40<LSN≤50	Alta
LSN>50	Daños severos

2.5 Asentamientos inducidos post-licuación

A medida que se disipa el exceso de presión poro generado por el sismo, la relación de vacíos del suelo se vuelve más baja de lo que era antes del evento sísmico, produciendo un cambio volumétrico el cual se manifiesta en forma de asentamiento (Ishihara & Yoshimine, 1992).

El asentamiento post-licuación se puede estimar mediante los desplazamientos verticales causados por el asentamiento debido a la re-consolidación del suelo que ha licuado (reacomodo de partículas) siguiendo las metodologías descritas en Zhang et., al. (2002), o en Idriss & Boulanger (2008), de las cuales, una fue desarrollada por Ishihara & Yoshimine (1992), quienes observaron que las deformaciones volumétricas post-licuación que ocurren durante la re-consolidación de las muestras de arenas, estaban directamente relacionadas con las deformaciones

máximas por corte inducidas por las cargas cíclicas y con la densidad relativa inicial de las arenas, Figura 2.

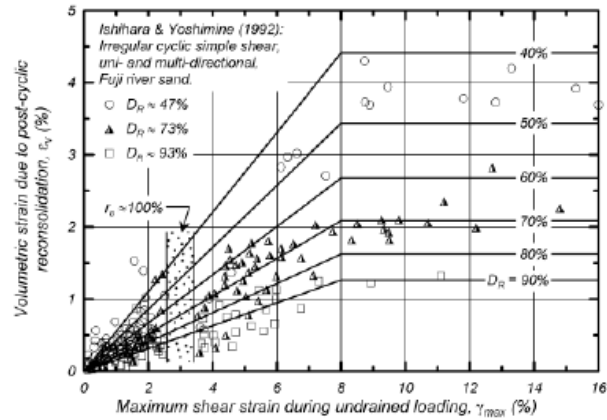


Figura 2. Relación entre deformación volumétrica vertical post-licuación y la deformación máxima por corte inducida durante cargas cíclicas en arenas limpias (Tomada de Idriss & Boulanger, 2008)

La deformación volumétrica vertical provocada por la disipación de presión de poro es estimada según la siguiente expresión:

$$\varepsilon_v = 1.5 \exp[-0.369\sqrt{(N_1)_{60CS}}] * \min(0.08, \gamma_{m\acute{a}x}) \quad (4)$$

Para determinar el valor de la deformación máxima por corte inducida durante cargas cíclicas, se puede emplear la relación obtenida entre el factor de seguridad (FS_L) y este, o utilizar las expresiones desarrolladas en función de la resistencia a la penetración estándar SPT, o sea,

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \min \left[\gamma_{lim}, 0.035(2 - FS_{liq}) \left(\frac{1 - F_\alpha}{FS_{liq} - F_\alpha} \right) \right] \quad (5)$$

donde,

$$F_\alpha = 0.032 + 0.69\sqrt{(N_1)_{60CS}} - 0.13(N_1)_{60CS} \quad \text{Para } (N_1)_{60CS} \geq 7 \quad (6)$$

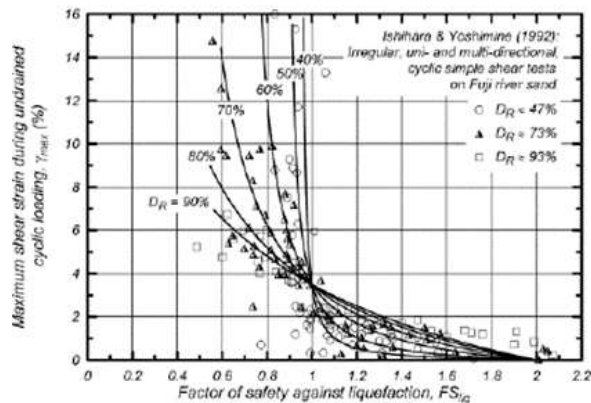


Figura 3. Relación entre la deformación máxima por corte y el factor de seguridad (FS) contra licuación, basado en ensayos de cargas cíclicas de corte en muestras de arenas a diferentes densidades relativas (Ishihara & Yoshimine 1992, Tomada de Idriss & Boulanger, 2008)).

El asentamiento de la superficie en campo libre inducido por licuación se estima calculando la deformación volumétrica que experimentará un estrato de arena y multiplicando esa deformación por el espesor de la capa que se está analizando.

2.6 Criterio de la superficie no licuable

Las consecuencias del asentamiento post-licuación unidimensional pueden mitigarse en gran medida por la presencia de una gruesa capa no licuada sobre los suelos licuados. Esta se conoce como Costra no licuable (Ishihara 1985, Naesgaard et al. 1998, Bouckovalas y Dakoulas 2007). Una gruesa capa no licuada entre la cimentación y el estrato licuado puede actuar como una capa puente que arquea o redistribuye los esfuerzos y, por lo tanto, da como resultado un asentamiento de la superficie del suelo más uniforme. De esta manera, un edificio bien construido sobre cimientos poco profundos puede asentarse ligeramente pero no sufrir ningún daño, porque el asentamiento diferencial es pequeño (Idriss & Boulanger, 2008).

La Figura 4 indica el beneficio de una gruesa capa superficial no licuada que recubre el material licuable, como lo postuló Ishihara (1985).

Como tal, la información que proporciona la Figura 4 se puede utilizar para examinar la reducción de las consecuencias asociadas con el asentamiento post-licuación unidimensional, en donde el eje horizontal representa el espesor de una superficie o costra no licuable, H_1 , sobre el cual subyace un estrato potencialmente licuable y cuyo espesor, H_2 , está representado en el eje vertical.

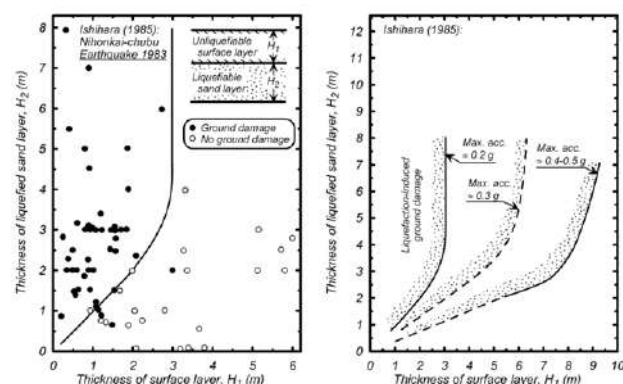


Figura 4. Combinaciones de espesor de la capa superficial no licuable, espesor de la capa licuable y aceleración máxima de la superficie del suelo que distinguen entre el daño en la superficie del suelo y la ausencia de tal daño (Ishihara & Yoshimine 1992, Tomada de Idriss & Boulanger, 2008)

3 DESCRIPCIÓN DE LOS PROYECTOS

Los casos de éxito que se presentan en este artículo consisten en 2 desarrollos residenciales ubicados en

la línea costera de la Riviera Nayarit y de Jalisco, y una estación de compresión de gas en Veracruz, cuya exploración geotécnica se basó en pruebas de campo SPT y CPT. La estratigrafía se constituye de arenas con bajo contenido de finos y nivel de aguas freáticas superficial, lo cual indicaba que todos los sitios tenían un potencial de licuación alto considerando los parámetros de diseño sísmico provenientes de los espectros de diseño especificados.

3.1 Condiciones geotécnicas

De acuerdo con la información geotécnica reportada en el estudio de suelos en la línea costera de Riviera Nayarit, las condiciones estratigráficas por debajo del Nivel de Terreno Natural (NTN), consisten en un estrato de arena mal graduada de compacidad suelta de 4.0 m de espesor, subyacente por arena bien graduada con limo de compacidad media a compacta hasta una profundidad de 6.0 m, subyacente por arena limosa de compacidad compacta hasta la profundidad máxima de exploración (10.2 m). Durante los trabajos de campo, el Nivel de Aguas Freáticas (NAF) fue detectado entre 2 y 4.3 m de profundidad.

Para el proyecto en Jalisco, las condiciones estratigráficas por debajo del NTN, consisten en un estrato de arena con poco limo de compacidad suelta hasta una profundidad de 1.5 a 3 m, subyacente por arena con limo de compacidad media a compacta hasta 4.5 m de profundidad, subyacente por roca hasta la profundidad de máxima de estudio (9.0 m). El nivel freático de diseño se consideró a NTN.

Para el proyecto en Veracruz, las condiciones estratigráficas por debajo del NTN, consisten en un estrato de arena con limo suelta a medianamente densa a aproximadamente 9.0 a 16.0 m de profundidad, sustentada por arcilla medianamente rígida a muy rígida a aproximadamente 20 m de profundidad, seguida de arcilla muy rígida a dura hasta la máxima profundidad de exploración de 30m. El Nivel de Aguas Freáticas (NAF) fue detectado entre 1.0 y 3.0 de profundidad.

En la tabla 3, se resumen las características geotécnicas de las zonas potencialmente licuables para cada proyecto.

Tabla 3. Resumen zonas potencialmente licuables para sitios de estudio

Sitio	Espesor de Estrato Licuable (m)	SUCS	CF%	Prof. NAF (m)	Prof. Estrato Competente (m)
Nayarit	6.0	SP	4	2.0	9.0
Jalisco	3.0	SP	4	0.5	4.5
Veracruz	9.0	SP-SM	6	1.0	12.0

3.2 Análisis de licuación en campo libre

La caracterización geotécnica de los desarrollos residenciales y de la estación de compresión de gas indica una susceptibilidad al fenómeno de licuación

de arenas de acuerdo a la metodología de Idriss and Boulanger (Idris & Boulanger, EERI 2008), considerando los parámetros mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de diseño sísmico para análisis de licuación provenientes de espectros de diseño

Zona	Mw	PGA (a0)
Rivera Nayarit	8.4	0.5 g
Jalisco	7.5	0.7 g
Veracruz	6.4	0.37 g

Con base en los análisis de susceptibilidad de licuación y los FS_L asociados, también se estimaron los asentamientos post-licuación (δv), así como los valores LPI y LSN para una condición de campo libre sin contemplar el efecto del mejoramiento de suelos. Los resultados son presentados en las Figuras 10, 11 y 12, y se resumen en la Tabla 5.

Para la zona de Riviera Nayarit se puede observar riesgo de licuación alto, con la presencia de asentamientos aproximados de 15 cm, pudiendo generarse de manera diferencial. Además, se pueden apreciar los resultados con LPI del orden de 36, y LSN del orden de 45, lo que indica un riesgo severo de licuación.

Para la zona costera de Jalisco, los resultados del análisis de licuación se presentan en las Figuras 10, 11 y 12, con LPI del orden de 10, LSN del orden de 28, indicando un riesgo de licuación moderada, con posibles asentamientos post-licuación del orden de 4.5 cm.

Para la estación de compresión de gas en Veracruz, el riesgo es alto, presentando asentamientos post-licuación del orden de 12 cm, LPI máximo 13 y LSN máximos de 46. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de asentamientos post-licuación, LPI y LSN para condiciones de campo libre

Zona	δv_{max}	LPI _{max}	LSN _{max}
Rivera Nayarit	14.5	36	45
Jalisco	4.5	10	28
Veracruz	11.5	13	46

Con base en los resultados de los análisis de licuación en campo libre, se determinó que el desempeño los tres proyectos no es aceptable en términos de deformación y riesgo sísmico. Es por esto que se recomendó un mejoramiento de suelos con sistema de X1® de desplazamiento como se describe más adelante.

4 RESULTADOS

4.1 Reducción de riesgo de licuación usando elementos X1® de desplazamiento

La metodología de mitigación de licuación de suelos para el sistema X1® de desplazamiento, se basa principalmente en densificación del suelo alrededor del elemento de agregado compactado y en el efecto de incremento de esfuerzos laterales. Ambos ayudan

a reducir sustancialmente las deformaciones por cortante inducidas dinámicamente y la generación de exceso de presión de poros ante cargas cíclicas (Zalachoris et. al, 2023., Amoroso et., al. 2022).

El grado de densificación de la arena después de la instalación del sistema X1® de desplazamiento se puede estimar conociendo el incremento en el número de golpes ($\Delta N_{(imp)}$, $\Delta q_{t(imp)}$) que se puede alcanzar en campo, sumado a los valores de resistencia in-situ (N_{SPT} , q_c) para obtener valores de resistencia post-mejoramiento teóricos (N'_{SPT} del ensayo SPT o de resistencia de punta q'_c del ensayo de CPTu) que se usan durante la etapa de diseño. El aumento de la resistencia del suelo es dependiente del contenido de finos, el diámetro del elemento X1® de desplazamiento, y el espaciamiento entre elementos.

$$N'_{SPT} = N_{SPT} + \Delta N_{(Imp)} \quad (7)$$

$$q'_c = q_c + \Delta q_{t(Imp)} \quad (8)$$

Los valores estimados que se pueden alcanzar se seleccionan de manera empírica, basado en numerosos proyectos ejecutados que nutren las bases de datos. La resistencia de suelo post-mejoramiento estimada se puede introducir nuevamente en un análisis de licuación para condiciones mejoradas, para posteriormente validar en campo los valores teóricos de resistencia usados durante la etapa de diseño.

4.2 Diseño de Elementos X1® de desplazamiento para densificación.

Para cada uno de los proyectos se hizo un diseño de mejoramiento de suelos que consideraba la caracterización geotécnica y demanda sísmica, así como las descargas estructurales que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Área propuesta para mejoramiento con sistema X1®

Sitio	Área aproximada (m2)	Presión máx. aplicada (kPa)
Nayarit	7,180	20
Jalisco	12,422	25
Veracruz	32,139	120

En todos los proyectos se evaluó el desempeño para licuación de suelos, así como para estados límites de falla y servicio. El asentamiento máximo permisible establecido para todos los proyectos fue de 2.5 cm. Con base en lo anterior, el resultado para el diseño de mejoramiento de suelos resultó en elementos de diámetro y espaciamientos variables. Las profundidades de mejoramiento fueron de 3 m – 5 m para Riviera Nayarit, 2 m – 3.5 m para Jalisco, y 3.5 m – 8 m para la estación de compresión de gas en Veracruz.

4.3 Instalación de elementos X1® de desplazamiento para densificación

Lo elementos X1® fueron construidos conforme al diseño en cada uno de los proyectos. En el proyecto residencial en Jalisco se encontró rechazo debido a presencia de roca superficial.

En las figuras 5 y 6 se muestran fotos del proceso constructivo.



Figura 5. Elementos de agregado compactado con arena del sitio con sistema X1® de desplazamiento.



Figura 6. Instalación del sistema X1® de desplazamiento usando arenas del sitio

4.4 Resultados de la reducción de riesgo de licuación usando Elementos X1® de desplazamiento

Una vez concluido el mejoramiento de suelos con el sistema X1® de desplazamiento, se realizó una campaña de exploración de suelos con la finalidad de corroborar el aumento de resistencia del suelo debido a la densificación inducida por el proceso constructivo, y así mismo verificar la reducción del potencial de licuación presente en la zona mejorada. La campaña de exploración consistió en sondeos de Penetración Estándar (SPT) y sondeos de Penetración de Cono Eléctrico (CPTu) previos y posteriores al mejoramiento de suelos. En la Tabla 7 se resume para cada sitio la cantidad y tipo de la campaña geotécnica.

Tabla 7. Campaña de exploración pre y post mejoramiento

Sitio	SPTPre	SPTPost	CPTUPre	CPTuPost
Nayarit	5	7	-	-
Jalisco	-	-	21	21
Veracruz	4	4	-	15

El sitio en Riviera Nayarit, la instalación de elementos X1® de desplazamiento para densificación resultó en un incremento del 130% en el número de golpes de la prueba SPT, con respecto al número de golpes in-situ, Figura 7.

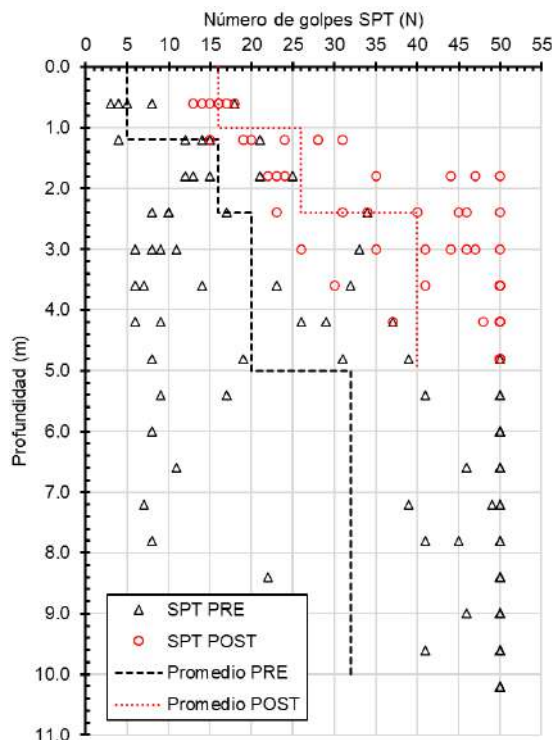


Figura 7. Comparación de número de golpes en los SPT previos al mejoramiento y posteriores al mejoramiento, Riviera Nayarit

En el sitio en Jalisco, para las exploraciones CPTu se mostró un incremento promedio de resistencia por punta (q_c) de 7 MPa, resultando en un incremento de aproximado del 100%, Figura 8.

En la estación de comprensión de gas en Veracruz, se registró un incremento del 180% para los números de golpes del SPT, y un incremento del 200% en los valores N_{60} correlacionados a los sondeos CPTu, Figura 9. Además, se observa que la densificación alcanza profundidades mayores a la profundidad máxima de mejoramiento.

Cabe mencionar que la correlación utilizada para la correlación del N_{60} basado en q_c del CPT (Robertson et al., 1986), presenta la misma tendencia de los valores N obtenidos en las pruebas SPT.

El incremento de resistencia mostrado en las figuras anteriores, sugiere una reducción en el riesgo de licuación presente en la zona. Para verificar esto, se realizaron análisis de susceptibilidad a licuación en condiciones mejoradas, en el cual se utilizó el criterio de Idriss and Boulanger (EERI 2008), para cada uno de los sondeos SPT y CPTu correspondientes, considerando los mismos parámetros sísmicos mostrados en la Tabla 4. Los resultados se resumen a continuación en la Tabla 8.

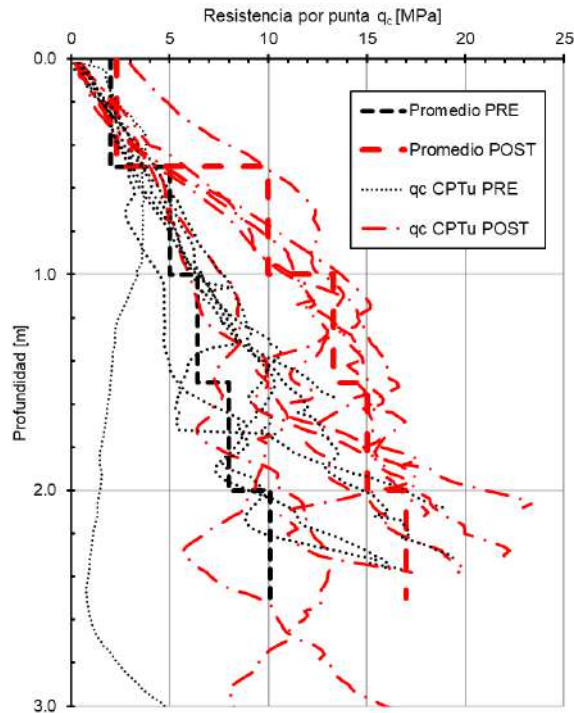


Figura 8. Comparación de sondeos CPT previo y posterior al mejoramiento zona Jalisco

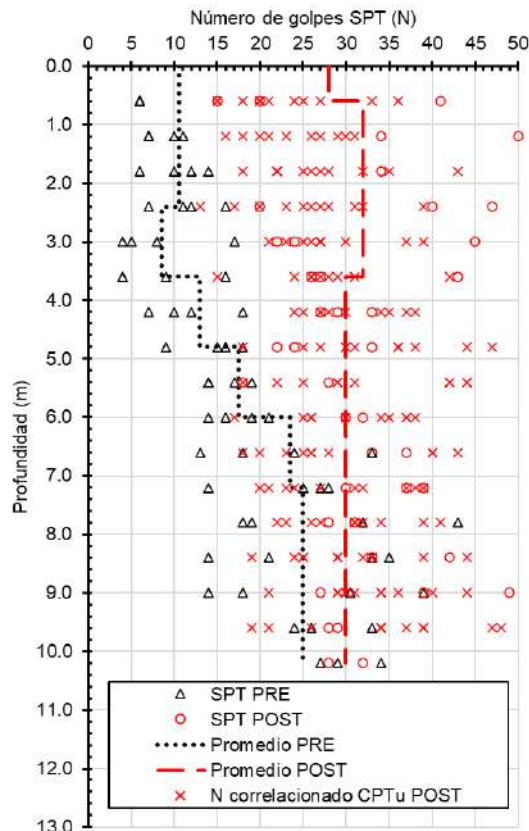


Figura 9. Comparación de sondeos SPT Y CPT previo y posterior al mejoramiento Estación de Compresión de Gas en Veracruz

Tabla 8. Cálculo de asentamientos post-licuación, LPI y LSN para condiciones reforzadas con X1® de desplazamiento con arenas del sitio

Zona	δv_{max}	LPI _{max}	LSN _{max}
Rivera Nayarit	0.2	0.5	0.1
Jalisco	0.4	3.0	5.0
Veracruz	4.0	4.0	9.0

4.4.1 Asentamiento Post-Licuación

Los resultados de asentamiento post-licuación para los tres proyectos se estimaron con base en la resistencia obtenida en campo después del mejoramiento de suelos, y se resumen en la Figura 10.

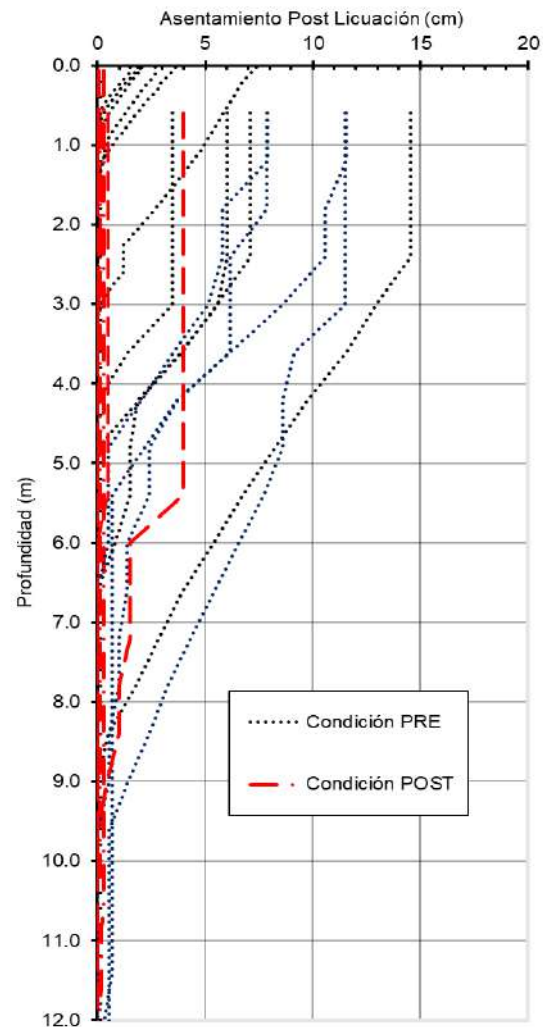


Figura 10. Comparación de asentamientos post-licuación en condiciones previas y posteriores al mejoramiento para Riviera Nayarit, Jalisco, y Estación de Compresión de Gas en Veracruz

4.4.2 Índice de Potencial de Licuación LPI

En la Figura 11 se observa que el LPI estimado para la condición post-mejoramiento son igual o menor a 5 para todos los proyectos, en Jalisco, Riviera Nayarit, y para la estación de compresión de gas en Veracruz. Esto contrasta con los valores LPI de condición campo libre que alcanzaban hasta 36 para la zona de Jalisco.

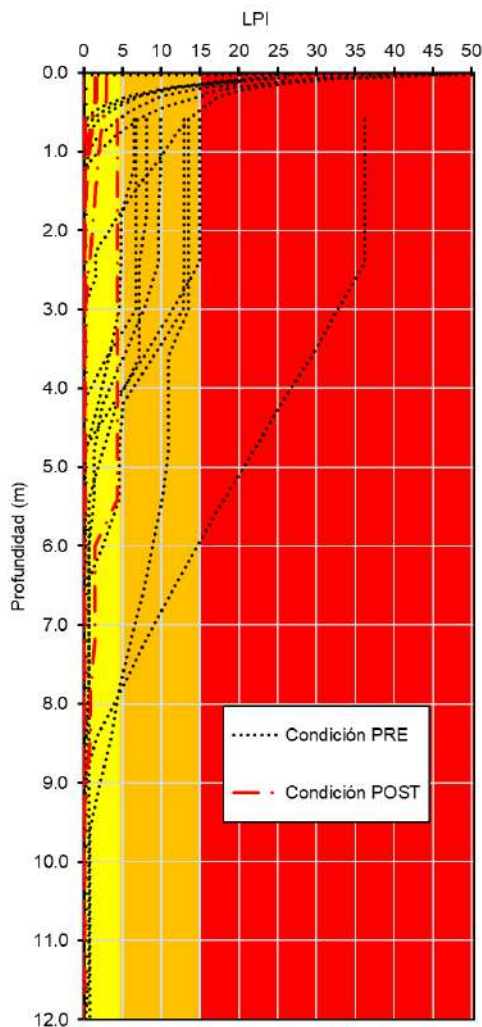


Figura 11. Comparación de Índice de Potencial de Licuación en condiciones previas y posteriores al mejoramiento para Riviera Nayarit, Jalisco, y Estación de Compresión de Gas en Veracruz

4.4.3 Número de Severidad de Licuación (LSN)

En la figura 12 se puede observar que el valor de LSN para condiciones post-mejoramiento es menor a 10, para ambos desarrollos, así como para el proyecto en Veracruz, lo cual indica que la severidad del daño inducido por la licuación es baja o despreciable.

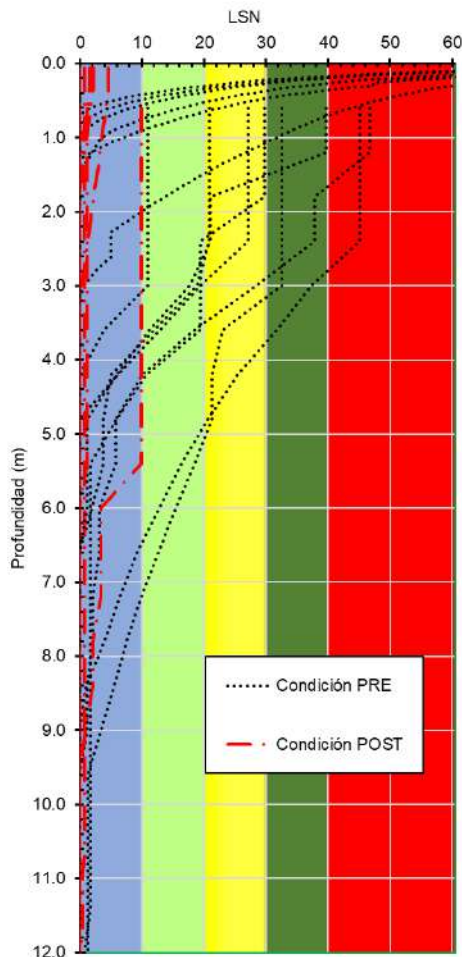


Figura 12. Comparación de Número de Severidad de Licuación en condiciones previas y posteriores al mejoramiento para Riviera Nayarit, Jalisco, y Estación de Compresión de Gas en Veracruz

5 CONCLUSIONES

- Los análisis convencionales de susceptibilidad de licuación evalúan el riesgo mediante factores de seguridad contra licuación. El uso de indicadores de riesgo como LPI, LSN, asentamientos post-licuación y el criterio de la superficie no licuable, ayudan a afinar el criterio para el diseño de mejoramiento de suelos basado desempeño.
- Los elementos X1® de desplazamiento para densificación de suelos usando arenas del sitio, son un sistema de mejoramiento diseñado para densificar suelos arenosos de baja compacidad que ayudan a reducir el riesgo de licuación, aumentar la capacidad de carga admisible del terreno, y a controlar asentamientos estáticos y dinámicos.
- Este sistema se utilizó en tres zonas costeras del país en las cuales, con base en la información geotécnica disponible del sitio, se detectó un problema de licuación con una severidad media a

alta de acuerdo a los resultados de los análisis de licuación en campo libre.

- El resultado de la densificación inducida por el sistema X1[®] de desplazamiento, resultó en un incremento del número de golpes SPT del orden del 130% para el sitio de Riviera Nayarit. Para las exploraciones CPTu del sitio de Jalisco, se mostró un incremento promedio de resistencia por punta (q_c) de 7 MPa, el cual equivale al 110% del valor in-situ.
- Para la estación de compresión de gas en Veracruz, el incremento promedio de ΔN_{SPT} fue de 17 golpes. El incremento de ΔN_{60} correlacionado por q_{cCPT} , fue de 20 golpes con respecto a los N del SPT in-situ. Esto representa un incremento del 180% al 200% para cada prueba, respectivamente.
- Los resultados de un análisis de licuación en condiciones mejoradas indican que el riesgo de licuación disminuyó considerablemente tomando como referencia los indicadores propuestos en el documento. En resumen, se obtuvieron los siguientes resultados:
 - o El asentamiento Post-Licuación estimado para condiciones mejoradas son menores a 1 cm.
 - o El Índice de Potencial de Licuación LPI es igual o menor a 5, tanto para el desarrollo ubicado en la zona costera de Jalisco, como en el ubicado en la Riviera Nayarit, y para la estación de compresión de gas en Veracruz, concluyendo que el potencial de licuación es bajo.
 - o El Número de Severidad de Licuación (LSN) es menor a 10, para los tres proyectos, lo cual indica que la severidad del daño inducido por la licuación es poca o nula.

REFERENCIAS

- Bray, J.D. and Sancio, R.B. (2006). Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Eng.* ASCE 132(9), 1165-1177.
- Boulanger, R.W and Idriss, I.M., R.W. (2014). "CPT and SPT based liquefaction triggering procedures". Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis, California. Report No. UCD/CGM-14/01.
- Idriss, I.M., and. (2008). "Soil Liquefaction During Earthquakes". Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.
- Lawton, E.C., Fox, N. S., and Handy, R. L. (1994). "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers." In-situ Deep Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 45, American Society of Civil Engineers, 121-132.
- Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1971). "Simplified procedures for evaluating soil liquefaction Potential." *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, 97(9), pag. 1249-1273.
- Yoshimine, M., Nishizaki, H., Amano, K., & Hosono, Y. (2006). Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4), 253-264.
- Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1168-1180.
- Van Ballegooy, S., Malan, P., Lacrosse, V., Jacka, M. E., Cubrinovski, M., Bray, J. D., & Cowan, H. (2014). Assessment of liquefaction-induced land damage for residential Christchurch. *Earthquake spectra*, 30(1), 31-55.
- Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes.
- Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2014) "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures" Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Van Ballegooy, S., Roberts, J.N., Stroke K.H., Cox, B.R., Wentz, F.J., Hwang, S., (2015). Large-Scale Testing of Shallow Ground Improvements using Controlled Staged-Loading with T-Rex. 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand.
- Franke, Kevin W. and Olson, Scott M., (2021). Practical consideration regarding the probability of liquefaction in engineering design. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*
- Bouckovalas, G., and Dakoulas, P., 2007. Liquefaction performance of shallow foundations in presence of a soil crust, in *Earthquake Geotechnical Engineering, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering-Invited Lectures*, K. D. Pitilakis, ed., Springer, Netherlands, 245-76.
- Ishihara, K., 1985. Stability of natural deposits during earthquakes, in *Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 321-376.
- Naesgaard, E., Byrne, P. M., and Ven Huizen, G., 1998. Behaviour of Light Structures Founded on Soil Crust over Liquefied Ground, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, Geotechnical Special Publication No. 75, P. Dakoulas, M. Yegian, and R. D. Holtz, eds., ASCE, 422-33.
- Georgios Zalachoris, Ph.D., Dimitrios Zekkos, Ph.D., Alba Yerro, Ph.D., Allen Bowers, Ph.D., and Kord J. Wissmann, Ph.D., (2023) 3D Numerical

- Assessment of Rammed Aggregate Pier Performance under Dynamic Loading in Liquefiable Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 149, Issue 3, March 2023.
- Organización Panamericana de la Salud OPS, (1985). *Crónicas de Desastres - Terremoto de México*, No. 3 (Pan American Health Organization (PAHO), 129 P.
- Lazcano, S., (2001). Sismicidad histórica de Guadalajara, Jal. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ing. Sísmica*, Guadalajara, Jalisco.
- Rangel, J.L., Tena, C.A., and Gómez, B.A. (2010). Efectos geotécnicos y estructurales observados en el valle y ciudad de Mexicali, provocados por el sismo El mayor-Cucupah del 4 de abril del 2010. *XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Acapulco, Guerrero, Volumen: Vol. II, pp. 765-780.
- Guzman, J.A., Williams, F., Riquer, G., Vargas, A., Leyva, R. (2020). Fallas de licuación de suelos inducidas por el sismo de Tehuantepec del 7 de septiembre de 2017 (Mw 8.2) en la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México. *Revista Ingeniería Sísmica* No. 102, 82-106 (2020).
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K.-i., and Yasuda, S. (1978). "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan." *Proc., 2nd Int. Conf. on Microzonation*, San Francisco, 885–896.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., and Sato, H. (1982). "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods." *Proc., 3rd Int. Earthquake Microzonation Conf.*, Seattle, 1319–1330.
- Amoroso, S., García M.F., Monaco, P., Tonni, L., Gottardi, G., Rollins, K.M., Minarelli, L., Marchetti, D. and Wissmann, k. (2022). Comparative Study of CPTU and SDMT in Liquefaction-Prone Silty Sands with Ground Improvement, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 148 Issue 6 - June 2022.
- Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J., 1986. Use of Piezometer Cone data. In: *Situ'86 Use of Ins-itu testing in Geotechnical Engineering*, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, SM 92, pp 1263-1280.