ATMIRE

Title	Propuesta de diseño de mejoramiento de suelos licuables con Columnas de grava para la construcción de un supermercado en Tumbes
Item Type	info:eu-repo/semantics/bachelorThesis
Authors	Estela Alarcon, Alvaro Gonzalo;Vila Tolentino, Lino Luis
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Download date	2026-11-28 09:01:45
Item License	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	http://hdl.handle.net/10757/682810



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de diseño de mejoramiento de suelos licuables con Columnas de grava para la construcción de un supermercado en Tumbes

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Estela Alarcon, Alvaro Gonzalo	0009-0000-2373-6772
Vila Tolentino, Lino Luis	0009-0008-9039-4379

ASESOR(ES)

Aronés Villavicencio, Álvaro Paulo	0000-0002-6430-0200

Lima, 02 de noviembre de 2024

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres por el apoyo incondicional que me han dado a lo largo de mi crecimiento personal y profesional. A mi hermano, que me motiva a seguir mejorando. Y finalmente, a mis familiares que no dudaron en brindarme su apoyo y cariño. Nada hubiera sido posible sin ustedes.

Lino Luis Vila Tolentino

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios, ya que sin Él nada hubiera sido posible. A mis padres, por su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera, a pesar de todas las dificultades que existieron. A mi hermana Valeria y mi Tita, por la compañía, comprensión y cariño durante todo este largo camino.

Alvaro Gonzalo Estela Alarcón

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al ingeniero Álvaro Aronés, por guiarnos y aconsejarnos durante nuestra investigación y a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, por brindarnos una educación de alto nivel y forjarnos como profesionales íntegros e innovadores.

RESUMEN

El presente estudio examina la problemática de la licuefacción en suelos arenosos saturados en la región costera de Tumbes, Perú, donde se proyecta construir un supermercado. La licuefacción, un fenómeno que ocurre durante sismos y provoca pérdida de estabilidad y resistencia en el suelo, representa un riesgo significativo para las infraestructuras en áreas de alta actividad sísmica y con presencia de suelos arenosos. Como solución, esta investigación propone la instalación de columnas de grava para mejorar el suelo, aumentando su factor de seguridad y disminuyendo los asentamientos post-licuefacción.

A través de un análisis geotécnico y el uso de software especializado como Settle 3D, se evaluaron los parámetros del suelo antes y después de la mejora, utilizando ensayos de penetración estándar (SPT) y simulaciones. Estos análisis permitieron estimar los asentamientos unidimensionales por deformación volumétrica vertical y calcular el potencial de licuefacción en el sitio de estudio, demostrando que el uso de columnas de grava reduce significativamente los asentamientos y aumenta la capacidad de carga del suelo, cumpliendo con los requisitos de seguridad estructural.

En conclusión, la implementación de columnas de grava se confirma como una técnica eficaz para mitigar los efectos de la licuefacción en suelos costeros peruanos, garantizando una mayor estabilidad y minimizando los riesgos de fallos estructurales en zonas sísmicas de alta vulnerabilidad.

Palabras clave**:** Licuefacción; columnas de grava; asentamientos; factor de seguridad; mejora de suelos.

Design proposal for liquefiable soil improvement using gravel columns for the construction of a supermarket in Tumbes

ABSTRACT

This study addresses the issue of soil liquefaction in saturated sandy soils in the coastal region of Tumbes, Peru, where a supermarket construction project is planned. Liquefaction, a phenomenon that occurs during seismic events and causes a loss of soil stability and resistance, poses a significant risk to infrastructure in high-seismicity areas and sandy soils. As a solution, this research proposes the installation of gravel columns to improve the soil, increasing its safety factor and reducing post-liquefaction settlements.

Through geotechnical analysis and the use of specialized software such as Settle 3D, soil parameters were evaluated before and after improvement, using Standard Penetration Tests (SPT) and simulations. These analyses enabled the estimation of one-dimensional settlements by vertical volumetric deformation and calculation of liquefaction potential at the study site, demonstrating that the use of gravel columns significantly reduces settlements and increases soil bearing capacity, meeting structural safety requirements.

In conclusion, the implementation of gravel columns is confirmed as an effective technique for mitigating liquefaction effects in Peruvian coastal soils, ensuring greater stability and minimizing the risk of structural failure in high-vulnerability seismic zones.

Keywords: Liquefaction; gravel columns; settlements; safety factor; soil improvement.

Trabajo_75886397.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	16%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	1%
4	www.geopier.com Fuente de Internet	1%
5	cenepred.gob.pe Fuente de Internet	1%
6	idus.us.es Fuente de Internet	<1%
7	dspace.ups.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	

TABLA DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.1.1 Antecedentes Internacionales 1

1.1.2 Antecedentes Nacionales 2

1.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA 3

1.2.1 Realidad problemática 3

1.2.2 Características del problema 4

1.2.3 Delimitación del problema 5

1.3 ESTADO DEL ARTE 5

1.4 OBJETIVOS 7

1.4.1 General 7

1.4.2 Específicos 7

1.5 INDICADORES DE LOGRO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 7

1.6 JUSTIFICACIÓN 8

1.7 LIMITACIONES 8

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 10

2.1 LICUEFACCIÓN DE SUELOS 10

2.1.1 Definición de licuación 10

2.1.2 Licuefacción en suelos arenosos 10

2.1.3 Métodos para hallar el potencial de licuefacción 10

2.1.4 Asentamientos 10

2.1.5 Factor de seguridad 11

2.2 COLUMNAS DE GRAVA 11

2.2.1 Definición 11

2.2.2 Diseño de cimentación 12

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO 13

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN 13

3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 14

3.2.1 Recolección de datos de la zona de estudio 14

3.2.2 Elaboración del perfil de suelos 16

3.2.3 Evaluación de implementación en el caso de estudio 18
3.2.4 Evaluación de asentamientos con Settle 3D 18
3.2.5 Evaluación de asentamientos Post-Licuefacción 21
3.3 VALIDACIÓN DEL PROYECTO 38
3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 40
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **43**
4.1 CONCLUSIONES 43
4.2 RECOMENDACIONES 44
5 REFERENCIAS **45**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Cálculo de Módulos de Elasticidad* 18
Tabla 2 Datos iniciales 22
Tabla 3 Factores de corrección y número de golpes corregido a una energía del 60% (N60) 23
Tabla 4 Cálculo de número de golpes corregido (N1)60 24
Tabla 5 Cálculo de número de golpes corregido por finos N1 60cs 25
Tabla 6 Cálculo del Factor de seguridad 27
Tabla 7 Cálculo de la deformación cortante máxima 29
Tabla 8 Cálculo del asentamiento pot-licuefacción antes de la mejora 30
Tabla 9 Nuevo número de golpes (Nspt) debido a la mejora 31
Tabla 10 Diámetro estimado de las columnas de grava considerando el NSPT 32
Tabla 11 Parámetros preliminares para el diseño de la propuesta 32
Tabla 12 Nuevos parámetros obtenidos después de la mejora 33
Tabla 13 CRR aumentado, debido al aumento del coeficiente de empuje lateral 34
Tabla 14 Cálculo del nuevo Factor de seguridad 35
Tabla 15 Cálculo de la nueva deformación cortante máxima 35
Tabla 16 Cálculo del nuevo asentamiento post-licuefacción 36
Tabla 17 Cálculo del asentamiento final post-licuefacción por deformación volumétrica vertical 38
Tabla 18 Asentamiento total punto de inspección WB-10 39
Tabla 19 Asentamiento total punto de inspección WB-11 39
Tabla 20 Asentamiento total punto de inspección WB-11 39
Tabla 21 Mejora de asentamiento con implementación de columnas de grava en puntos de estudio 40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Mapa de las zonas de Licuefacción de Suelos del Perú* 3
Figura 2 Árbol de problema 4
Figura 3 Método de dos capas para estimar asentamientos de cimentaciones 12
Figura 4 Flujograma del diseño de la solución 13
Figura 5 Vista en elevación de la estructura 14
Figura 6 Cortes de la estructura 15
Figura 7 Perfil de suelo WB-09 y WB-10 16
Figura 8 Perfil de suelo WB-11 y WB-12 17
Figura 9 Distribución de los cimientos 19
Figura 10 Definición de las capas de suelo 19
Figura 11 Visualización de zona de estudio con capas de suelo definidas 20
Figura 12 Cálculo de asentamientos antes de la mejora 20
Figura 13 Tabla de correcciones para ensayo SPT 23
Figura 14 Incremento de número de golpes 31
Figura 15 Incremento de esfuerzo lateral 34
Figura 16 Incremento del esfuerzo efectivo cíclico (CRR) 41
Figura 17 Incremento del factor de seguridad (FS) 41
Figura 18 Reducción de asentamientos post-licuefacción 42

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Ortiz et al. (2022) examinaron los efectos de la licuefacción del suelo y otros fenómenos sísmicos asociados en la ciudad de Chone, tras el terremoto de 2016 en la costa de Ecuador. La licuefacción inducida por sismos puede ocasionar daños severos, desde destrucción parcial o total de estructuras hasta afectaciones críticas en redes de transporte e infraestructuras esenciales. Este riesgo se ha convertido en una preocupación destacada dentro de la ingeniería geotécnica y geológica moderna, debido a múltiples sismos que provocan vibraciones significativas en el terreno, lo cual ha llevado al desarrollo de nuevas metodologías para evaluar estos estratos.

Por su parte, Anusch (2017) exploró el comportamiento sísmico de taludes sobre suelos con potencial de licuación que fueron mejorados mediante columnas de grava. Su investigación empleó métodos tradicionales de estabilidad de taludes y el análisis de bloques deslizantes de Newmark para evaluar desplazamientos que podrían resultar de terremotos de subducción en Chile, tanto en terrenos sin mejorar como en aquellos con columnas de grava instaladas. Las conclusiones indican que las columnas de grava contribuyen eficazmente a mejorar la estabilidad de los terraplenes, aumentando la densidad relativa del suelo y reduciendo su susceptibilidad a la licuación. Sin embargo, también se observó que este método no es suficiente en términos de estabilidad de taludes cuando el área de reemplazo es de solo un 5% y el valor inicial de (N1)60 es 5, debido a la falla de flujo.

En otro estudio relevante, Bautista y Mayorga (2018) analizaron la eficiencia de las columnas de grava para disminuir los asentamientos en suelos blandos en Bucaramanga, Colombia, mediante un modelo a escala utilizando el software PHASE 2. Se diseñó un experimento con dos estratos, uno de arcilla y otro de arena, en condiciones de saturación, para probar el método de columnas de grava. Se hicieron dos pruebas simultáneas: una con el suelo sin mejora y otra con el mismo suelo mejorado, ambos sometidos a una carga axial similar. Al comparar los resultados experimentales con los de la simulación, se observó que los asentamientos en el suelo mejorado con columnas de grava fueron un 25% menores, demostrando la eficacia de este método para reducir los asentamientos en suelos saturados.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

Bellido & Camayo (2022), en su estudio analizan el potencial de licuación y las técnicas de mejoramiento de suelos arenosos en el área de Lomo de Corvina, en Villa el Salvador. La investigación resalta el uso de columnas de grava como una solución efectiva para mejorar suelos cohesivos blandos, fortaleciéndolos al introducir estas columnas en perforaciones realizadas con vibradores u otros equipos de perforación convencionales, según el método de instalación elegido. Este método no solo incrementa la capacidad portante del suelo, sino que también mejora la estabilidad frente a deslizamientos en terraplenes, acelera la consolidación del suelo mediante la creación de drenajes verticales, y minimiza los asentamientos en servicio. Esta técnica es aplicable a diversos tipos de suelos, como arenas limosas, limos, limos arcillosos, arcillas y rellenos heterogéneos.

Otro antecedente nacional es el caso de (Poves, 2017), quien estudió el impacto de las columnas de grava compactada en la reducción de asentamientos en suelos blandos en el sector de Palian, con el objetivo de analizar su efecto en los asentamientos por consolidación primaria (considerando la interacción entre el suelo y la columna y los procesos de consolidación) del suelo existente en dicha área. Para obtener resultados de asentamientos por consolidación más realistas, se realizaron ensayos en diversas muestras representativas del suelo. Para analizar el efecto de las columnas de grava compactada, se desarrolló un modelo a escala reducida, conocido como "celda unitaria", en el cual se colocó una columna de grava central rodeada por una zona de suelo, y se simularon las cargas y condiciones de drenaje adecuadas. Además, se realizaron pruebas con tres diámetros diferentes (D=3 cm, D=4 cm y D=5 cm) para evaluar la influencia de las columnas de grava compactada. El estudio concluyó que las columnas de grava compactada son un método efectivo de mejoramiento del suelo, ya que ayudan a reducir los asentamientos en el sector de Palian mediante la redistribución de cargas entre el suelo y las columnas de grava. La reducción del asentamiento varía entre un 50% y un 85%, dependiendo del diámetro y la separación de las columnas de grava.

1.2 Análisis del Problema

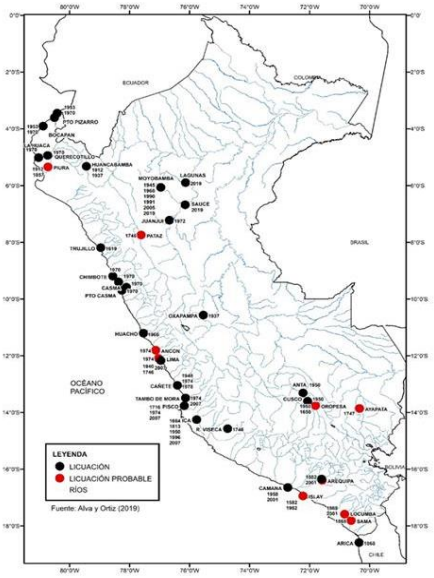
1.2.1 Realidad problemática

La licuefacción de suelos es un fenómeno que puede traer consigo consecuencias devastadoras. Un ejemplo de esto es el terremoto de Christchurch del 22 de febrero de 2011, evento en el cual muchas estructuras sufrieron graves daños debido a los movimientos de suelos inducidos por la licuación, lo cual resultó en 185 muertes y dejó a muchas otras personas gravemente heridas. Además, la mayor parte de los daños se produjeron en el distrito central de negocios de Christchurch (CBD), por lo que el 70% de las edificaciones tuvieron que ser demolidas (D. Bray et al., 2013).

En el caso de Perú, el fenómeno de licuefacción se presenta en la costa, sierra y en zonas selváticas del Perú, con mayor incidencia en la costa y en suelos arenosos. Por ello, (Alva & Ortiz, 2020) prepararon un mapa que ilustra las áreas afectadas por este fenómeno.

Figura 1

Mapa de las zonas de Licuefacción de Suelos del Perú



Nota. Se presenta un mapa de licuefacción de suelos que presenta distinciones entre casos de licuefacción seguros y licuefacciones probables. De "Actualización de la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú", por Alva y Ortiz, 2020.

En el caso de las zonas costeras, y reforzando lo mencionado por Alva & Ortiz, el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2020) señala que, en un escenario de riesgo sísmico para la costa central, la población con nivel de riesgo Muy Alto representa el 44.6% del total (4,807,754 personas), con riesgo Alto

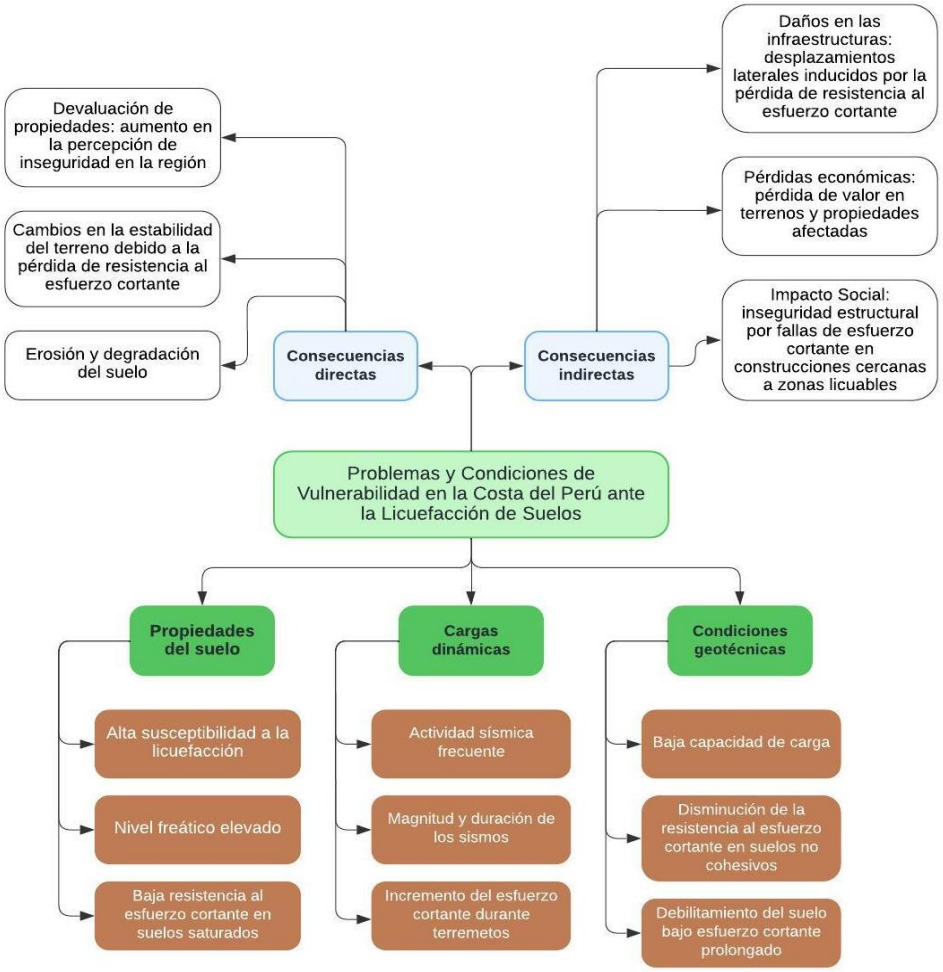
el 52.1% (5,614,016 personas), con riesgo Medio el 3.2% (360,361 personas), y con riesgo Bajo tan solo el 0.1% (2,462 personas). Además, las provincias que concentran la mayor población con nivel de riesgo Muy Alto son: Lima (4,177,986 personas) y Callao (629,768 personas). Esta última investigación destaca la importancia de este fenómeno en la costa del país, así como la vulnerabilidad de la población ante este tipo de desastres.

1.2.2 Características del problema

Con el fin de comprender mejor las causas y consecuencias, tanto directas como indirectas, se elaboró un árbol de problemas que ilustra de manera gráfica estos aspectos.

Figura 2

Árbol de problema



Nota. La imagen muestra un esquema que detalla los problemas y condiciones de vulnerabilidad en la costa del Perú ante la licuefacción de suelos. Se destacan las consecuencias directas e indirectas, como daños en infraestructuras, pérdidas económicas y devaluación de propiedades. Las causas se agrupan en tres categorías principales:

propiedades del suelo, cargas dinámicas y condiciones geotécnicas, cada una de las cuales contribuye a la susceptibilidad de la zona a los efectos de la licuefacción, especialmente bajo la influencia de actividad sísmica frecuente.

1.2.3 Delimitación del problema

Dado lo expuesto, existen suelo potencialmente licuables en el territorio peruano, especialmente en las zonas costeras. Por ello, esta investigación se enfoca en la región de Tumbes, ubicada en la costa norte del país, donde se encuentran almacenes logísticos, supermercados y otras estructuras vulnerables a la actividad sísmica y la licuefacción, comprometiendo su estabilidad. El estudio tiene como objetivo mejorar las condiciones del suelo para la construcción de un supermercado en esta área, con el fin de mitigar dichos riesgos.

1.3 Estado del Arte

Las investigaciones mostradas a continuación, recopilan estudios de la problemática de estudio, así como propuestas de solución.

Uno de los mayores desastres ocasionados por el Gran Terremoto del Este de Japón de marzo de 2011 fueron los daños por licuefacción en numerosas viviendas unifamiliares. Estas residencias experimentaron deformaciones, hundimientos e inclinaciones, lo que evidencia la falta de contramedidas para mitigar el impacto de la licuefacción del suelo. En respuesta a este problema, (Araki, 2024) propone una solución basada en el método de gaviones enterrados. Este enfoque busca minimizar la deformación y el fallo de edificios pequeños debido a la licuefacción, lo que contribuiría a mitigar los daños provocados por los terremotos y a acelerar la reconstrucción en zonas urbanas. La investigación se enfocó específicamente en el uso de gaviones de geomalla, que consisten en cestas rectangulares fabricadas con geomalla de polipropileno y rellenas de grava. Posteriormente, se realizaron pruebas en una mesa vibratoria utilizando un modelo a escala, enfocándose en el asentamiento de los cimientos y en el comportamiento del terreno durante la licuefacción. A partir de estas pruebas, el autor concluyó que la deformación del terreno sugiere una supresión parcial de la licuefacción en las proximidades del gavión, y planteó que este efecto podría mitigar el asentamiento del modelo de cimentación. Asimismo, determinó que el asentamiento de la cimentación en franja con geomalla y gaviones de geomalla disminuyó aproximadamente un 40 % en comparación con el asentamiento de la cimentación en franja

sin contramedidas. Se espera que la instalación de geomalla en la parte inferior de la cimentación en nuevas construcciones aumente el efecto mitigador del asentamiento.

Por otro lado, (A. Flores et al., 2022) resaltan en el contexto de la ingeniería geotécnica aplicada a zonas costeras que la licuefacción de suelos representa un desafío crítico, en este caso en particular para la cimentación de tanques de almacenamiento en la refinería Dos Bocas, Tabasco, México. La problemática radica en la alta susceptibilidad de estos suelos a la licuefacción bajo condiciones sísmicas, lo que podría comprometer la estabilidad estructural de los tanques. Para mitigar este riesgo, se implementó una solución basada en la instalación de Columnas de Grava Compactada (CGC). La metodología incluyó un análisis geotécnico previo, seguido de la instalación de 980 CGC de 12.5 metros de longitud y 0.5 metros de diámetro, distribuidas estratégicamente para reforzar el suelo bajo los tanques. Los resultados obtenidos, evaluados mediante pruebas de penetración de cono (CPTu) y estándar (SPT), mostraron una mejora significativa en la resistencia del suelo y una reducción de los asentamientos post-licuefacción de 40 cm a 5 cm. Las conclusiones indican que el uso de CGC no solo mitigó eficazmente el fenómeno de licuefacción, sino que también mejoró la estabilidad global del terreno, proporcionando una solución costo-efectiva y eficiente para la cimentación de estructuras críticas en áreas susceptibles a la licuefacción.

De igual manera, (Liang et al., 2021) sugieren utilizar columnas de piedra como medida de mitigación de la licuefacción, utilizando un método de evaluación integrado que combina densificación, distribución del esfuerzo cortante y criterio de drenaje. Concluyeron que, al adoptar el proceso de construcción por vibración de alimentación inferior, el coeficiente de permeabilidad del material de la columna se reduce a la mitad debido a la mezcla de partículas de arena. Además, recomiendan que el coeficiente de reducción para el criterio de esfuerzo cortante adopte el valor mínimo calculado por los métodos de Priebe y Báez, y para la evaluación del criterio de drenaje, sugieren aplicar el método de Onoue que considera la resistencia del pozo.

Finalmente, para complementar las soluciones expuestas, (Niroumand & Niroumand, 2022) evaluaron en su investigación el desempeño del sistema de pilares de compactación por impacto de grava (GICP) para mejorar una arena limosa suelta de 3,5 metros de espesor en un sistema de suelo costero ubicado en Bushehr, Irán. La capa de suelo arenoso licuable se encontraba sobre capas de arcilla con una consistencia que variaba de moderada a muy rígida y debajo de una capa de terraplén de ingeniería de 1,8 metros de espesor. El fin de esta

solución fue utilizar el sistema de pilares para mejorar las capas de suelo licuable y aumentar la capacidad portante y reducir el asentamiento de la subrasante para soportar las infraestructuras de superficie. Concluyeron que, para reacondicionar las capas de suelo granular sueltas y licuables bajo el terraplén de ingeniería, es posible realizar simultáneamente la excavación del terraplén de ingeniería y pasar a través del relleno de roca y las capas de escombros utilizando un sistema combinado especial. Además, concluyeron que los pilares de compactación por impacto de grava son un sistema autorregulador para aumentar la densidad relativa del suelo. La inyección de grava se realiza a través de columnas de grava creadas bajo un nivel de energía específico del martillo hidráulico instalado en la excavadora, y se lleva a cabo siempre que no sea posible inyectar más grava. Como resultado, se crea un módulo de rigidez uniforme para la subrasante.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Disminuir el potencial de licuefacción de suelos mediante un diseño de columnas de grava.

1.4.2 Específicos

- Analizar las características geotécnicas de los suelos licuables en la costa peruana.
- Elaborar un diseño de columnas de grava que mejoren el esfuerzo cortante en suelos licuables.
- Cálculos de asentamientos post-licuación en condición mejorada.
- Evaluar la mejora del factor de seguridad respecto de la propuesta de diseño
- Evaluar asentamientos post-licuación de modo que sean menores al admisible

1.5 Indicadores de logro del Trabajo de Suficiencia Profesional

La investigación se centra en dos variables clave:

a) Factor de Seguridad:

Esta variable implica analizar cómo la implementación de columnas de grava puede mejorar el factor de seguridad del suelo tratado, lo que se traduce en una mayor estabilidad del terreno bajo cargas sísmicas. Un mayor factor de seguridad indica una mayor resistencia del suelo a la licuefacción, lo que es fundamental para garantizar la seguridad de las estructuras construidas en zonas de alto riesgo sísmico.

b) Asentamientos post-licuación:

Esta variable se enfoca en medir los asentamientos que ocurren después de un evento de licuefacción. El objetivo es que los asentamientos resultantes sean menores al nivel

admisible para evitar daños significativos en las edificaciones. Mantener los asentamientos dentro de límites aceptables es crucial para asegurar la funcionalidad continua de las estructuras y minimizar las reparaciones necesarias tras un sismo.

1.6 Justificación

El problema planteado resalta los efectos adversos de la licuefacción de suelos en diversas construcciones y edificaciones. Las zonas costeras del Perú, caracterizadas por suelos arenosos sueltos y saturados, son especialmente vulnerables a este fenómeno debido a su alta actividad sísmica. La licuefacción puede causar daños severos en estructuras esenciales como supermercados, almacenes logísticos, hospitales y viviendas, las cuales son cruciales para la economía local y el bienestar social de las comunidades. Por lo tanto, es esencial desarrollar soluciones efectivas para mitigar estos riesgos y proteger las infraestructuras críticas. El uso de columnas de grava como método de mejoramiento de suelos es una opción viable debido a su eficacia comprobada y bajo costo. Este método permite aumentar la capacidad de carga del suelo y reducir la probabilidad de licuefacción, proporcionando mayor estabilidad a las estructuras y reduciendo los costos de reconstrucción después de un sismo. Además, la implementación de estas técnicas puede asegurar la continuidad de los servicios esenciales y proteger la vida de las personas, aumentando la resiliencia de las comunidades frente a desastres naturales.

1.7 Limitaciones

- **Tiempo restringido para la investigación y el desarrollo del diseño:**

El tiempo disponible para realizar esta investigación es bastante limitado, lo que plantea desafíos significativos para planificar y completar todas las etapas del estudio de manera adecuada. Esta restricción de tiempo puede limitar la posibilidad de llevar a cabo una revisión profunda de la literatura existente, así como de recolectar y analizar datos de manera detallada. Además, el tiempo reducido podría dificultar la realización de varios ciclos de diseño y ajustes necesarios basados en los resultados iniciales, lo que puede impactar la solidez y precisión de las conclusiones obtenidas.

- **Aplicar la investigación in situ de manera constante**

La investigación requiere una implementación y monitoreo continuo en el lugar donde se desarrollará el estudio, lo cual es fundamental para observar cómo funcionan las técnicas de mejoramiento de suelos propuestas y validar los resultados de los modelos teóricos. Sin embargo, esta necesidad de seguimiento constante puede verse afectada por factores como

la dificultad de acceder al sitio, la disponibilidad de equipos y personal especializado, así como por posibles condiciones climáticas adversas que podrían interrumpir las actividades de campo. Estas restricciones pueden afectar la consistencia y precisión de los datos recolectados.

- **Requerimiento de un estudio geotécnico detallado del sitio:**

Para asegurar que los resultados de la investigación sean precisos y aplicables, es necesario realizar un estudio geotécnico exhaustivo del lugar de estudio. Este estudio debe incluir una caracterización detallada del suelo, análisis de cómo se comporta bajo diferentes cargas, y evaluación de aspectos como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la capacidad de soporte del terreno. Sin embargo, llevar a cabo un estudio de esta naturaleza implica varios desafíos, como los altos costos de las pruebas de campo y laboratorio, la necesidad de permisos de acceso, y el tiempo requerido para realizar los ensayos geotécnicos necesarios. Estas limitaciones pueden dificultar la obtención de datos precisos y representativos del comportamiento del suelo, lo cual es crucial para validar las técnicas de mejora propuestas.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Licuefacción de suelos

2.1.1 Definición de licuación

Youd & Idriss (2001) indican que la licuefacción es el proceso en el cual un suelo granular pasa de un estado sólido a uno licuado, debido al aumento de las presiones de poro y la disminución de las presiones efectivas del suelo. Este fenómeno ocurre principalmente en suelos sueltos o medianamente compactos que tienen un mal drenaje. Durante la licuefacción, el suelo se vuelve más blando y experimenta grandes deformaciones cíclicas, aumentando su deformabilidad.

2.1.2 Licuefacción en suelos arenosos

Los suelos arenosos en estado suelto tienden a densificarse cuando se someten a cargas repetitivas. Según Meneses (2019), las partículas del suelo comienzan a colapsar y a disminuir su volumen. Si el suelo no puede drenar el agua o el drenaje es muy lento, la presión del agua en los poros aumenta a medida que se acumula el colapso de más partículas, lo que eventualmente anula el esfuerzo efectivo sobre el suelo. Esto provoca que las partículas pierdan contacto entre sí, resultando en la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Durante este fenómeno, el suelo se comporta como un líquido viscoso que soporta la carga vertical que antes sostenía el suelo rígido.

2.1.3 Métodos para hallar el potencial de licuefacción

2.1.3.1 Método determinístico de Seed-Idriss

Boulanger & Idriss (2004) presentan un método simplificado para evaluar el potencial de licuefacción, el cual se basa en el índice de penetración estándar (SPT). En su análisis, afirman que el Factor de Seguridad (FS) se determina comparando la Capacidad de Resistencia a la Licuefacción (CRR) con la Solicitud de Licuefacción (CSR). A continuación, se presenta la ecuación del Factor de Seguridad, indicando que si su valor es inferior a 1.25, se prevé la posibilidad de licuación del suelo.

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

2.1.4 Asentamientos

Según Kramer (1996), la tendencia de las arenas a compactarse bajo la acción de movimientos sísmicos está bien respaldada por la evidencia. Esta compactación en el subsuelo se refleja en la superficie del terreno como asentamientos. Los asentamientos

provocados por terremotos suelen generar daños en las estructuras con cimientos superficiales y afectar a las infraestructuras críticas que están enterradas a poca profundidad. Las arenas secas se compactan de manera muy rápida; el asentamiento de un depósito de arena seca generalmente se completa al término de un terremoto. Por otro lado, el asentamiento de un depósito de arena saturada toma más tiempo, ya que este asentamiento ocurre solo cuando se disipan las presiones de poro generadas por el sismo. El tiempo necesario para que se produzca este asentamiento depende de factores como la permeabilidad y compresibilidad del suelo, así como de la longitud de la ruta de drenaje.

2.1.4.1 Asentamiento de Reconsolidación Post-Licuación

Ndoj & Hajdari (2014), señalan que el asentamiento del suelo provocado por un sismo se refiere a la deformación vertical que ocurre en la superficie del terreno, como resultado de la reconsolidación de las arenas saturadas tras la actividad sísmica. Este fenómeno es conocido como asentamiento inducido por licuefacción o asentamiento de reconsolidación post-licuefacción. Para analizar el asentamiento de reconsolidación post-licuefacción, es necesario estudiar tanto el potencial de licuefacción del suelo como la deformación posterior que se produce durante el proceso de reconsolidación. Estas evaluaciones pueden realizarse utilizando varios métodos, como las pruebas SPT, CPT y la onda de corte (Vs).

2.1.5 Factor de seguridad

Melentijavic (2005) indica que el factor de seguridad (FS) para una superficie de deslizamiento suele calcularse con base en la resistencia al corte del suelo. Esta resistencia indica la capacidad del suelo para soportar fuerzas sin llegar al fallo, considerando tanto las condiciones internas del material como las externas que lo afectan. Además, indica que el factor de seguridad se puede definir como la relación entre el valor actual de cohesión o ángulo de fricción del suelo y el valor necesario para asegurar la estabilidad estructural.

2.2 Columnas de grava

2.2.1 Definición

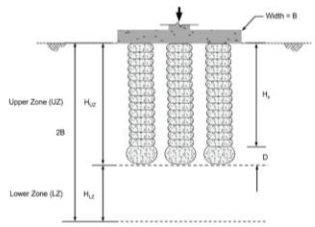
Desde los años 60, las columnas de grava ejecutadas con equipos de vibración profunda han sido utilizadas exitosamente para reforzar suelos blandos o sueltos de alta compresibilidad, acelerando la consolidación, reduciendo asentamientos, aumentando la capacidad portante y mitigando el riesgo de licuación (Carvajal et al., 2015).

2.2.2 Diseño de cimentación

Los elementos de refuerzo del suelo de la columna de grava sugerida por GEOPIER (2016) basan en un modelo de dos capas para regular los asentamientos de las cimentacione.

Figura 3

Método de dos capas para estimar asentamientos de cimentaciones



Nota. El asentamiento es: $S_{TOT} = S_{UZ} + S_{LZ}$. De "Proper load testing procedures to verify adequate design of Geopier supported foundation system, por GEOPIER (2016).

2.2.2.1 Asentamiento de la zona baja

Los asentamientos de la zona inferior (SLZ) en suelos granulares se estiman como:

$$S_{LZ} = \frac{q.I_{LZ}}{E_{LZ}}.H_{LZ}$$

Donde q es la tensión media del fondo de la zapata, I_{LZ} es el factor de influencia del estrés en la zona inferior, H_{LZ} es el espesor de la zona inferior, y E_{LZ} es el módulo elástico del suelo en la zona inferior (GEOPIER, 2016).

2.2.2.2 Asentamiento de la zona alta

Para cimientos de menos de 15 pies de ancho y elementos Geopier (columnas de grava) de hasta 15 pies de largo, o elementos de hormigón/lechada de cualquier longitud, los asentamientos de la capa superior pueden calcularse mediante una analogía de resorte (Lawton et al., 1994, como se cita en GEOPIER, 2016). Para columnas de más de 15 pies, se utiliza la siguiente fórmula:

$$S_{UZ} = \frac{q.I_{UZ}.H_{UZ}}{E_{comp}}$$

Donde q es la presión media del cojinete, es la influencia de la tensión de la zona superior, es el espesor de la capa de la zona superior y es la elasticidad compuesta. Donde q representa la presión de apoyo promedio, I_{UZ} es el factor de influencia de la tensión en la zona superior, H_{UZ} es el espesor de la capa de la zona superior, y E_{comp} es el valor del módulo elástico compuesto dentro de la zona reforzada con Geopier expresado como:

$$E_{comp} = E_g \cdot R_a + E_m \cdot (1 - R_a)$$

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

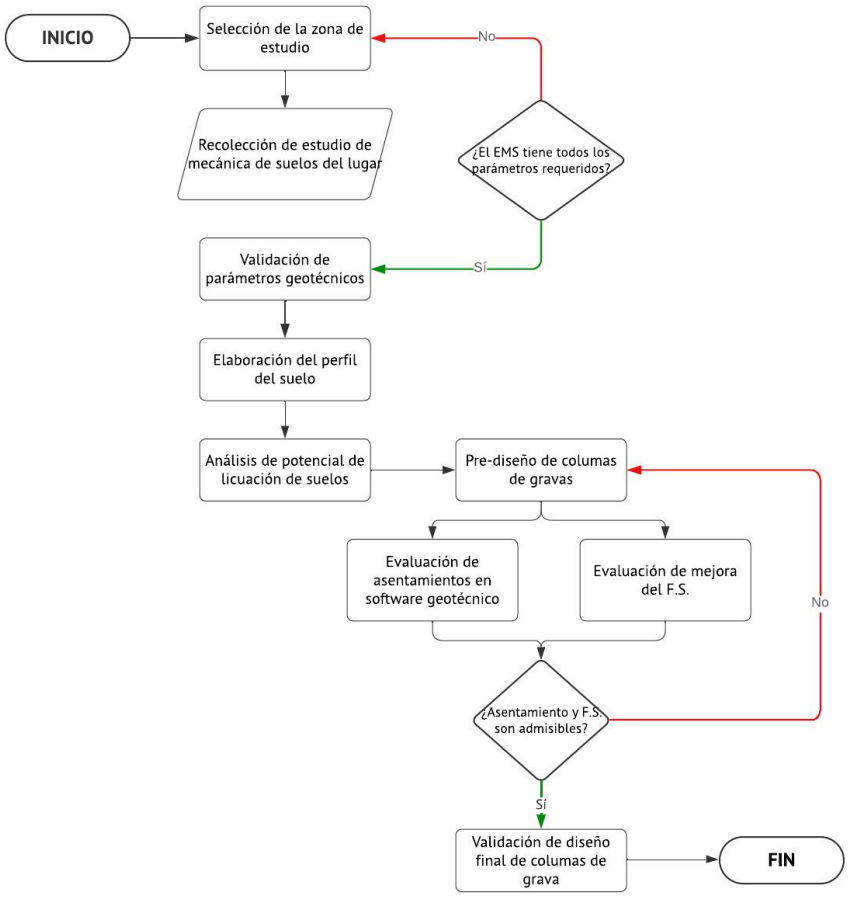
3.1 Diseño de la Solución

A continuación, se encuentra la lista de actividades a realizar:

- ✓ **Recolección de datos:** Se recolectarán información de datos generales y de estudios de mecánica de suelos realizados en la zona de estudio, y se obtendrán los parámetros necesarios para analizar el potencial de licuación y pre-diseño de columnas de grava.
- ✓ **Elaboración del perfil del suelo:** Con los datos validados elaborar el perfil.
- ✓ **Analizar el potencial de licuación de suelos:** Con los datos obtenidos se procederá al análisis de potencial de licuación de suelos en a través del método Seed e Idriss.
- ✓ **Propuesta de diseño de columna de gravas:** Elaborar un pre-diseño de columnas de grava con los requisitos necesario.
- ✓ **Validación y diseño final:** Validar el diseño a través de un software de simulación geotécnico para evaluar el mejoramiento de los asentamientos y validar si cumple el diseño cumple con un F.S. admisible.

Figura 4

Flujograma del diseño de la solución



3.2 Desarrollo de la Solución

3.2.1 Recolección de datos de la zona de estudio

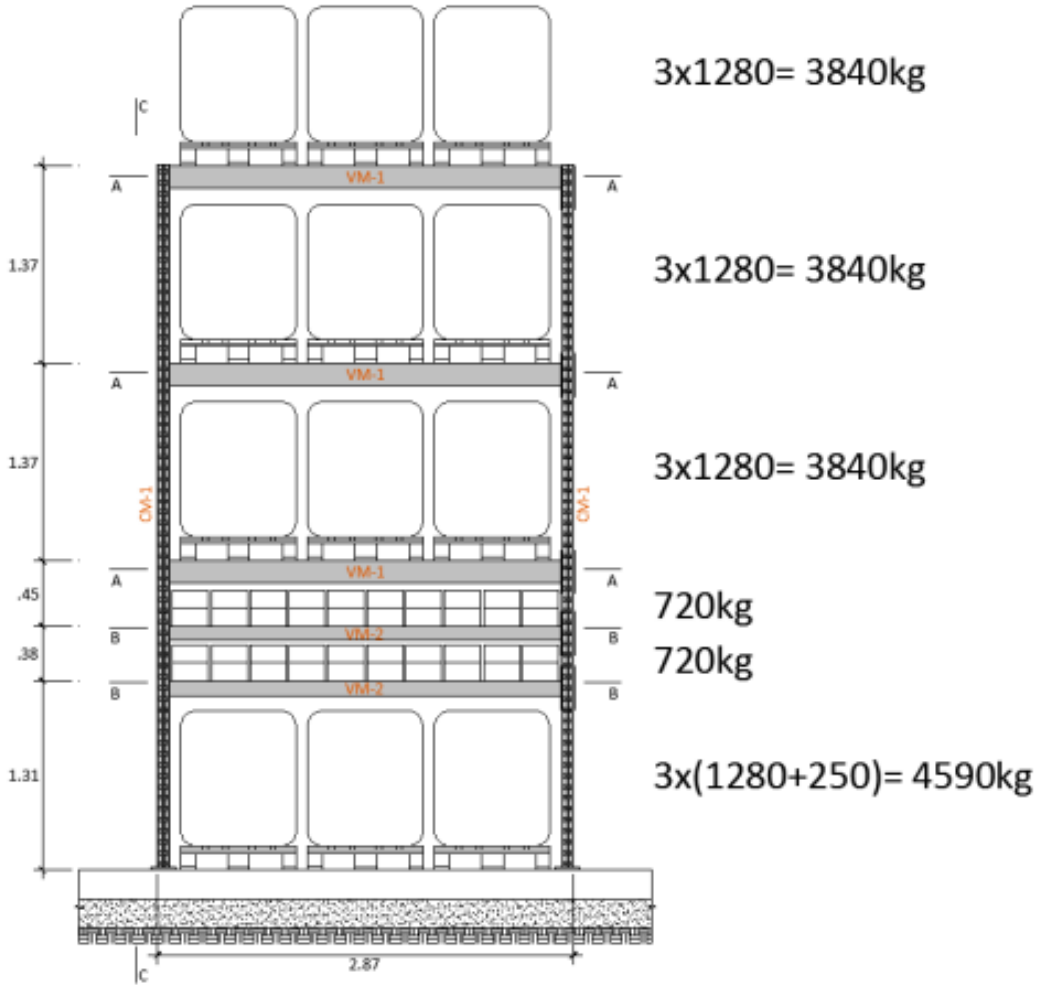
3.2.1.1 Datos generales de la zona de estudio

Tal como se expuso en el planteamiento del problema, la zona elegida será Tumbes, debido a que pertenece a la costa peruana, además de albergar distintos almacenes y supermercados.

Para la presente investigación, se plantea que el suelo sea capaz de soportar una tienda supermercado. Es por ello que se muestra de manera conceptual la estructura a soportar. En la figura 5 se presenta la vista en elevación de la estructura a soportar por el terreno.

Figura 5

Vista en elevación de la estructura

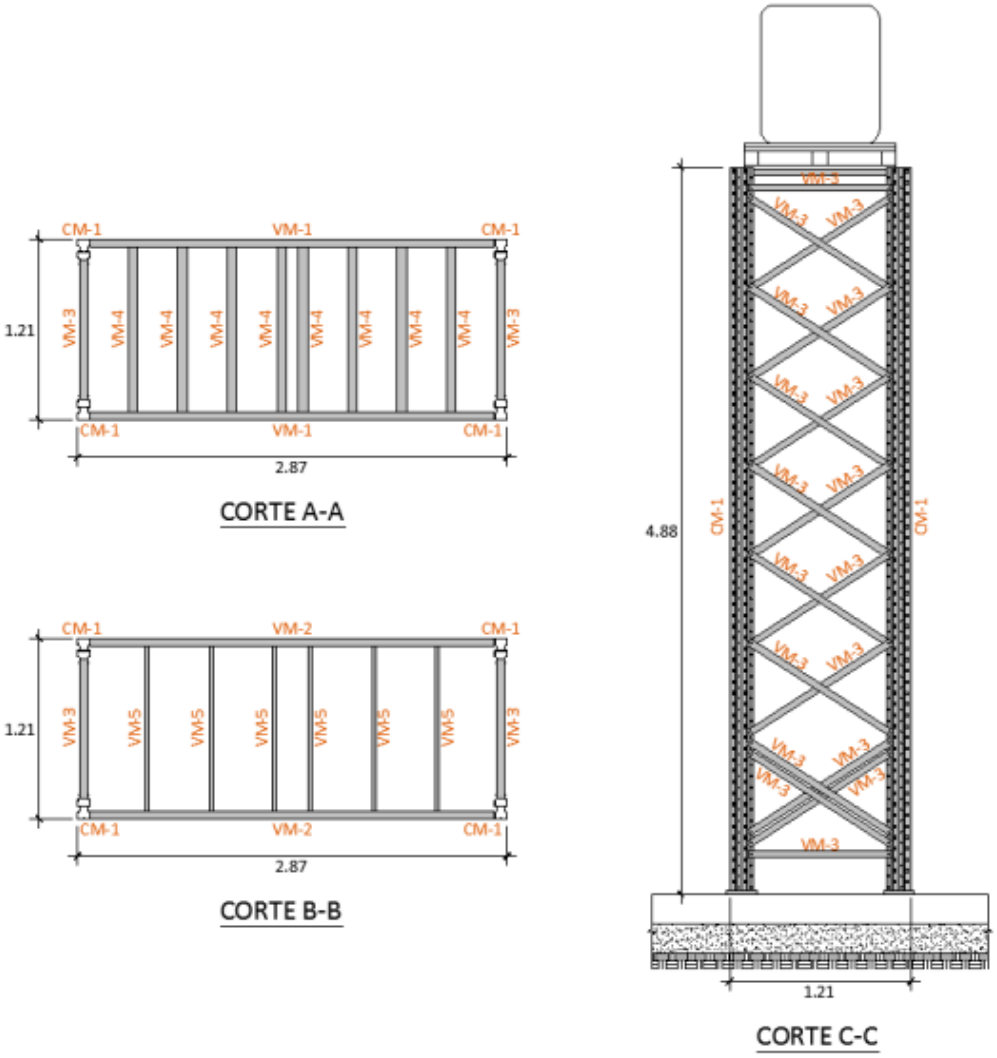


Nota. Se ha estimado que el peso propio del Rack es del orden de 700 kg y el efecto sísmico generado por el Rack sería un 12.5% del peso total. Considerando esto, la carga máxima por columna seria 7.7 tn (sin amplificar).

Por otro lado, en la figura 6 se muestra cortes de la estructura.

Figura 6

Cortes de la estructura



3.2.1.2 Estudio de Mecánica de Suelos del lugar (Tumbes)

Como se dijo anteriormente, la zona de estudio será en la región Tumbes. El estudio de mecánica de suelos obtenido incluye ensayos de penetración estándar (SPT), análisis granulométrico por tamizado, límites de Atterberg, contenido de Humedad, clasificación unificada, e incluso la evaluación del potencial de licuefacción de suelos. Para ello se eligieron con puntos para la zona de estudio, las cuáles nombraremos como: WB-9, WB-10, WB-11 y WB-12.

3.2.2 Elaboración del perfil de suelos

A partir de los sondeos WB-9, WB-10, WB-11 y WB-12 del ensayo SPT realizados, se elaboró el perfil de suelos de las cuatro perforaciones.

Figura 7

Perfil de suelo WB-09 y WB-10

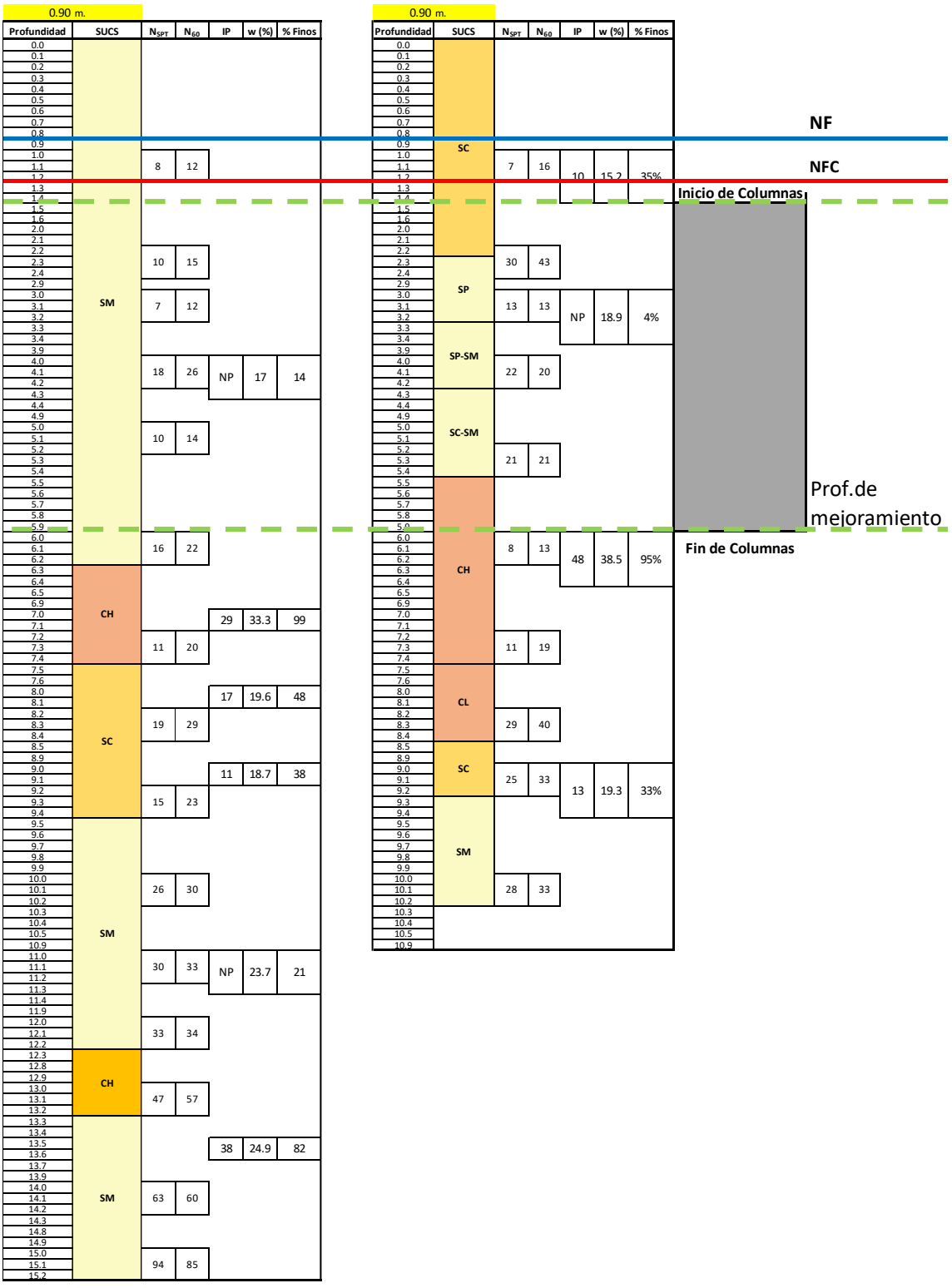
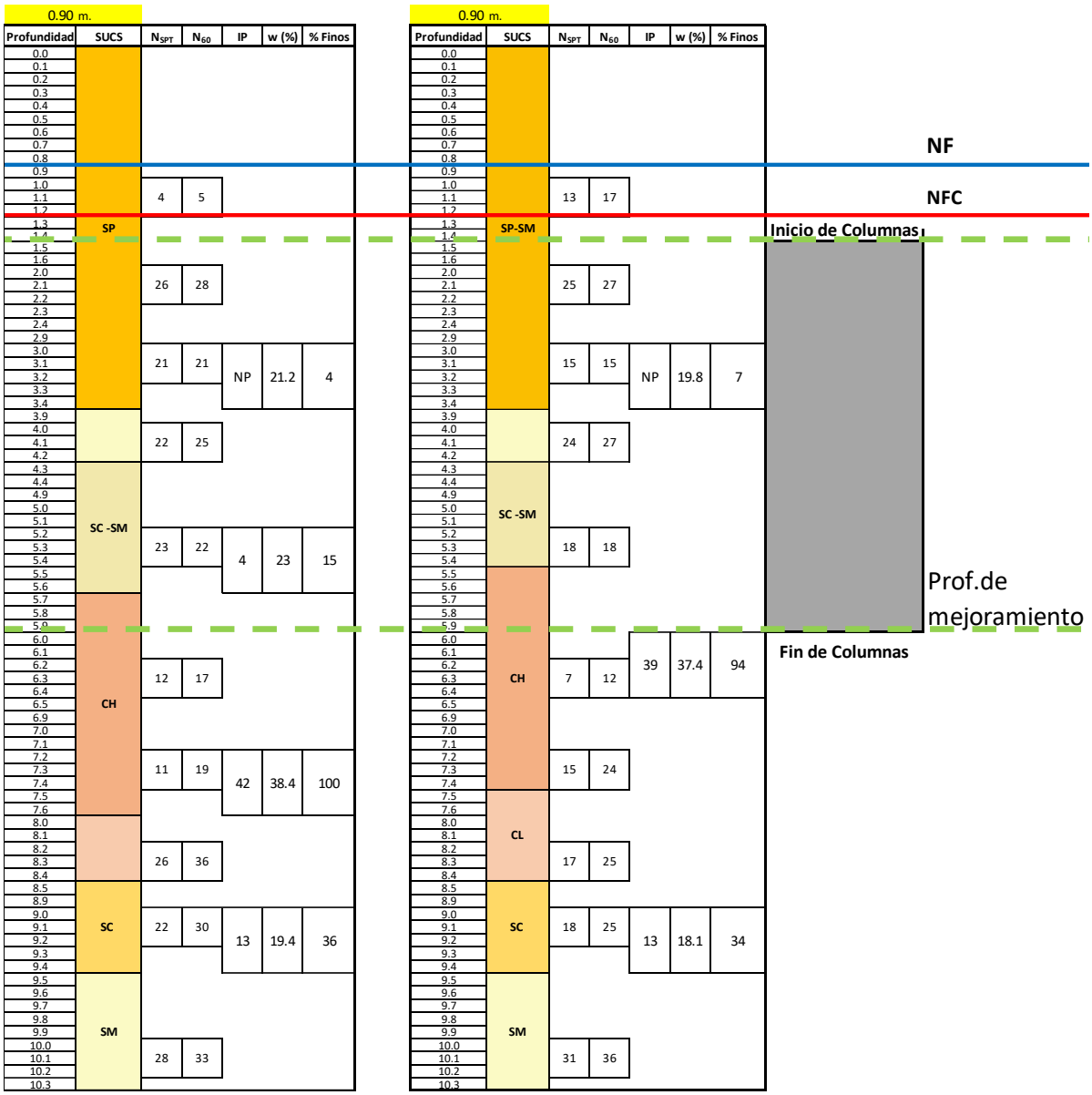


Figura 8

Perfil de suelo WB-11 y WB-12



Nota. Del perfil de suelos se puede identificar el nivel freático, el cual se encuentra a una profundidad de 0.90m. Además, el nivel de fondo de cimentación de las zapatas, medidas desde el nivel de terreno natural, se encuentra a una profundidad de 1.30m. Se aprecia que hasta los 5.7 m y 6.3 m aproximadamente, el suelo se caracteriza por estar compuesto principalmente de arena, siendo características de acuerdo con la clasificación SUCS los siguientes tipos de suelos: SM (Arena Limosa), SC (Arena Arcillosa), SP (Arena mal graduada) y SP-SM (Arena mal graduada con Limo).

3.2.3 Evaluación de implementación en el caso de estudio

Para el diseño preliminar de las columnas de grava se estableció una profundidad de 6 metros. Además, para el cálculo del Módulo de elasticidad en función de los ensayos SPT, se utilizó la fórmula correspondiente a arenas limosas y arenas arcillosas.

$$E_s = 300(N + 6)$$

A partir de esta fórmula se obtuvieron los valores según la profundidad y cantidad de golpes correspondientes, estos se encuentran en la siguiente tabla

Tabla 1

Cálculo de Módulos de Elasticidad

Profundidad (m)	Tipo de Suelos	Módulo de elasticidad (kPa)	Parámetros de Consolidación	
			Cc	Cs
2	SM	4200		
4	SM	5400		
6	SC-SM	6300		
8.5	CL		0.15	0.015
12	SC-SM	10800		
15	SC	10800		

Nota. Además, respecto a las cargas, se tendrá una carga promedio de 7.7 ton para las zapatas de acuerdo con el metrado de cargas, la cual es una carga estática baja.

3.2.4 Evaluación de asentamientos con Settle 3D

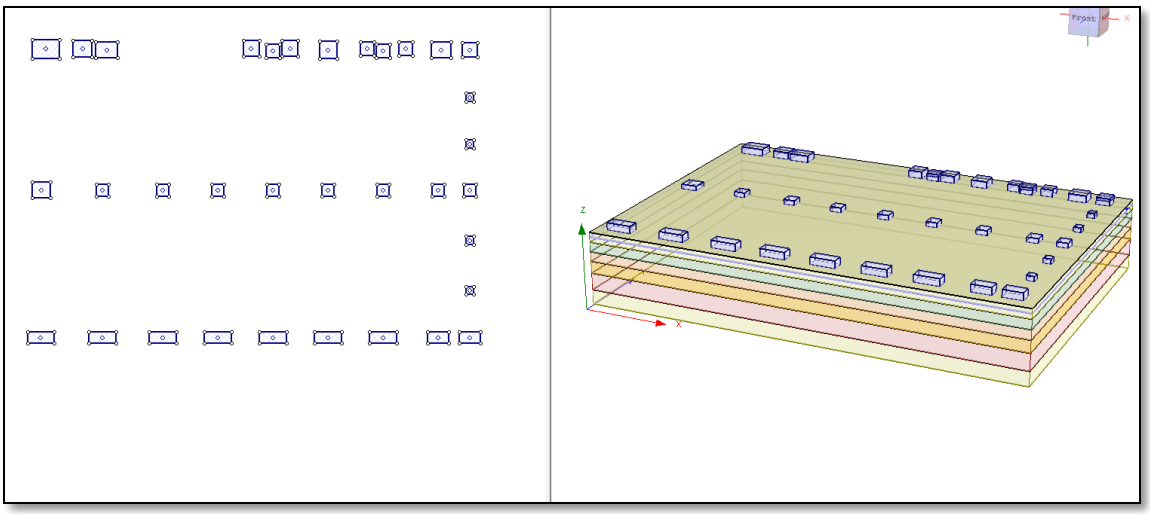
Previo a la propuesta de mejora, se determinarán los asentamientos en cargas estáticas para la zona de estudio, para posteriormente comparar con la propuesta mejorada.

Con los datos estructurales y geotécnicos de la zona de estudio se procede a realizar el modelado de la propuesta en el software Settle 3D.

A continuación, se muestra el proceso para el cálculo de asentamientos antes de la mejora:

Figura 9

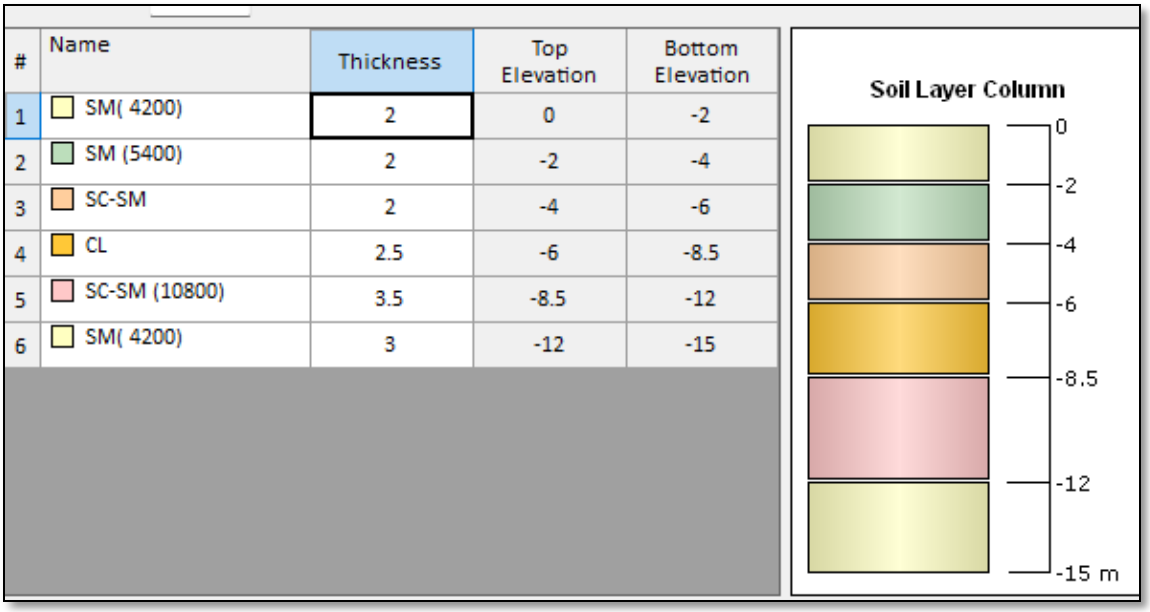
Distribución de los cimientos



Nota. En primer lugar, se importan los datos de la cimentación al software para poder iniciar con el modelado. De esta manera, se obtienen datos precisos de la cimentación y, también, se ingresan los datos geotécnicos correspondientes, sobre todo las cargas ya definidas.

Figura 10

Definición de las capas de suelo

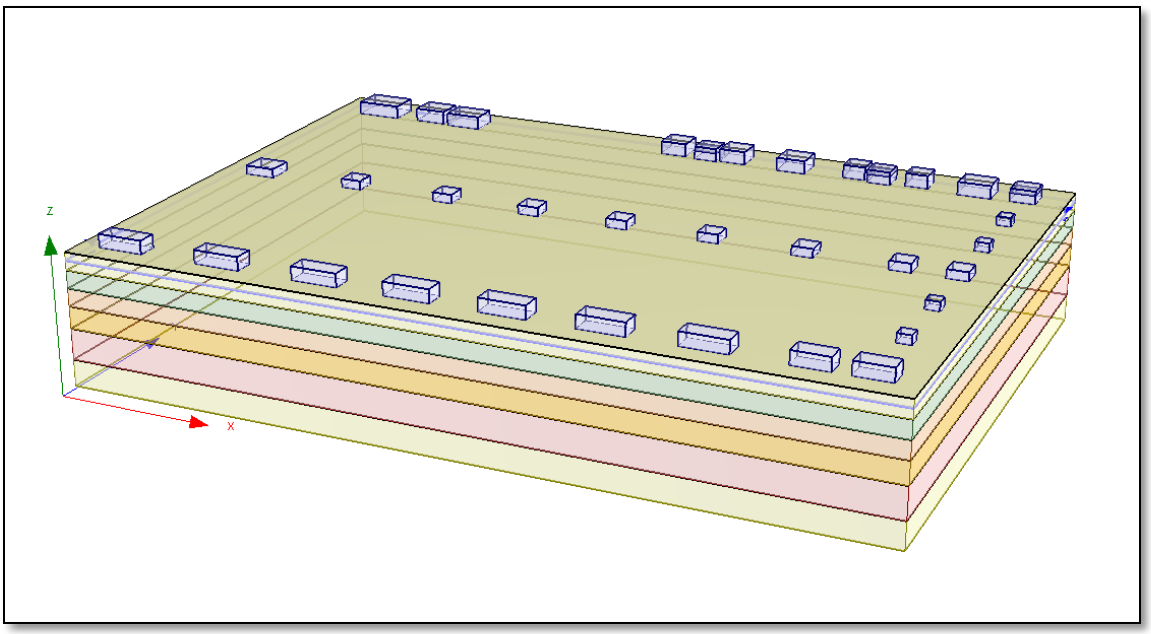


#	Name	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation
1	SM(4200)	2	0	-2
2	SM (5400)	2	-2	-4
3	SC-SM	2	-4	-6
4	CL	2.5	-6	-8.5
5	SC-SM (10800)	3.5	-8.5	-12
6	SM(4200)	3	-12	-15

Nota. Se procede a la definición de las capas de suelo para poder visualizar de mejor manera todos los tipos de suelo, según la clasificación SUCS, que se encuentran inmersos en el perfil estratigráfico.

Figura 11

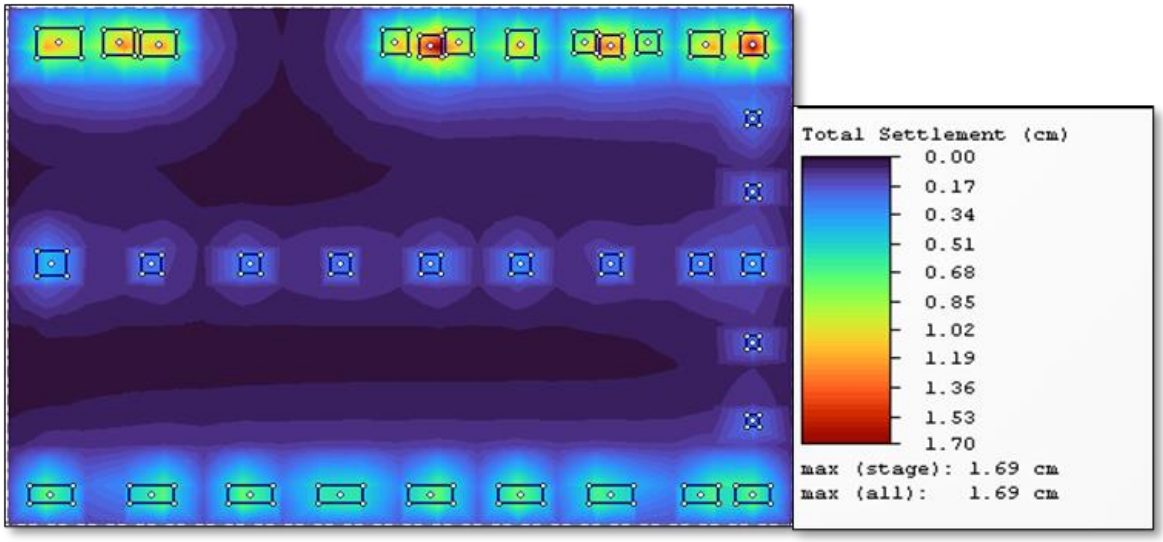
Visualización de zona de estudio con capas de suelo definidas



Nota. A continuación, se muestra la zona de estudio con las capas de suelo ya definidas según su profundidad correspondiente, lo cual nos permite identificar la cantidad de tipos de suelos existentes de una mejor manera.

Figura 12

Cálculo de asentamientos antes de la mejora



Nota Finalmente se procede a calcular los asentamientos en condición estática antes de la mejora, los cuales se pueden observar en la figura 10. Se puede observar que según los cálculos obtenidos los asentamientos son del orden de hasta 1.69 cm como máximo, lo cual indica que son menores a una pulgada. Por lo tanto, el diseño se determinará por el análisis de licuefacción.

3.2.5 Evaluación de asentamientos Post-Licuefacción

3.2.5.1 Cálculo de asentamientos Post-Licuefacción antes de la mejora

Para nuestro caso de estudio se calcularán los asentamientos post-licuefacción basado en datos de ensayos SPT, según el método de Idriss y Boulanger (2008). Además, es importante señalar que para este caso de estudio se realizará el cálculo de asentamiento unidimensional por deformación volumétrica vertical.

Previo a la propuesta de mejora, se determinarán también los asentamientos post-licuefacción para la zona de estudio, para posteriormente comparar con la propuesta mejorada.

El EMS de la zona de estudio nos brinda los siguientes parámetros de licuefacción:

- ✓ $a = 0.45$
- ✓ $Mw = 7.5$
- ✓ $N.F. = 0.9\ m$
- ✓ $P.E. = 17\,\frac{kN}{m3}\ (Encima\ del\ N.F.)$
- ✓ $P.E. = 18\,\frac{kN}{m3}\ (Debajo\ del\ N.F.)$

Donde:

- ✓ *a*: aceleración sísmica
- ✓ *Mw:* Magnitud de momento sísmico
- ✓ *N.F:* Nivel Freático
- ✓ *P.E:* Peso Específico

Para efectos de cálculo, en primer lugar, se realiza una tabla resumen con datos extraídos del Estudio de Mecánica de Suelos y el perfil de suelos realizado. Cabe resaltar que el proceso descrito a continuación es únicamente para un punto de estudio: WB-09.

Tabla 2

Datos iniciales

Profundidad	Nspt	SUCS	%finos	Er (%)
1.5	8	SM	14	60
2.5	10	SM	14	60
3.5	7	SM	14	60
4.5	18	SM	14	60
5.5	10	SM	14	60
6.5	16	SM	14	60
7.5	11	Arcilla	99	60
8.5	19	Arcilla	48	60
9.5	15	Arcilla	38	60
10.5	26	SM	21	60

Donde:

- ✓ Profundidad: Profundidad estimada en el perfil de suelos
- ✓ Nspt: Número de golpes
- ✓ SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
- ✓ %finos: Valor porcentual de la muestra que pasa por el tamiz N° 200
- ✓ Er (%): Porcentaje de energía

En segundo lugar, se realiza el cálculo correspondiente para obtener el número de golpes corregido N_{60}, el cual depende de los factores de corrección y el N_{SPT} obtenido del estudio de mecánica de suelos. A continuación, se muestra la fórmula utilizada:

$$N_{60} = N_{SPT} \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S$$

Donde:

- ✓ CE: Factor de corrección por energía
- ✓ CB: Factor de corrección por diámetro de forado
- ✓ CR: Factor de corrección por longitud de barra
- ✓ CS: Factor de corrección de muestreador
- ✓ N60: Número de golpes corregido
- ✓ Nspt: Número de golpes

Los factores de corrección en cuestión se obtienen a partir de la tabla presentada por Robertson y Wride (1988), la cual se muestra en la figura 13

Figura 13

Tabla de correcciones para ensayo SPT

Factor	Variable del equipo	Término	Corrección
Presión Efectiva	---	C_N	$(Pa/\sigma'_V)^{0.5}$
Presión Efectiva	---	C_N	CN ≤ 1.7
Relación de Energía	Martillo dona	C_E	0.5-1.0
Relación de Energía	Martillo de seguridad	C_E	0.7-1.2
Relación de Energía	Martillo dona automático	C_E	0.8-1.3
Diámetro de Perforación	65-115 mm	C_B	1
Diámetro de Perforación	150 mm	C_B	1.05
Diámetro de Perforación	200 mm	C_B	1.15
Longitud 1	< 3m	C_R	0.75
Longitud 2	3-4 m	C_R	0.8
Longitud 3	4-6 m	C_R	0.85
Longitud 4	6-10 m	C_R	0.95
Longitud 5	10-30 m	C_R	1
Método de Muestreo	Muestreo estándar	C_S	1
Método de Muestreo	Muestreo sin revestimiento	C_S	1.1-1.3

Nota. De "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", por Robertson y Wride, 1988 (https://acortar.link/N4RmHT).

Además, se muestra una tabla resumen con los valores obtenidos según la fórmula antes mencionada. Esto según el estudio de mecánica de suelos del presente caso de estudio.

Tabla 3

Factores de corrección y número de golpes corregido a una energía del 60% (N60)

Profundidad	Nspt	CE	CB	CR	CS	N60
1.5	8	1	1	0.75	1	6
2.5	10	1	1	0.75	1	7.5
3.5	7	1	1	0.75	1	5.25
4.5	18	1	1	0.85	1	15.3
5.5	10	1	1	0.85	1	8.5
6.5	16	1	1	0.95	1	15.2
7.5	11	1	1	0.95	1	10.45
8.5	19	1	1	0.95	1	18.05
9.5	15	1	1	0.95	1	14.25
10.5	26	1	1	1	1	26

Nota. El valor N_{60} se obtiene de la multiplicación de los factores de corrección mencionados por el valor de N_{SPT} obtenido en el estudio de mecánica de suelos.

Como tercer paso se realiza una corrección adicional al N60, debido a la variación en los esfuerzos totales durante la penetración en el suelo arenoso, se normaliza la resistencia a la penetración a un valor equivalente a una presión de sobrecarga efectiva de 1 atmósfera, aplicando el factor de corrección C_N. A continuación, se muestra la fórmula para obtener el valor de $(N_1)_{60}$.

$$(N_1)_{60} = N_{60} \times C_N$$

Donde:

- ✓ $(N_1)_{60}$: Valor de N_{60} corregido
- ✓ C_N: Factor de corrección

Liao y Whitman (1986) propusieron la siguiente ecuación para el cálculo del factor de corrección C_N.

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_v}}$$

Donde:

- ✓ P_a: Presión atmosférica en kPa
- ✓ σ'_v: Esfuerzo efectivo vertical en kPa

Luego de obtener el valor de C_N se procede a calcular el $(N_1)_{60}$ con la ecuación antes descrita. Este cálculo se muestra en la siguiente tabla resumen:

Tabla 4

Cálculo de número de golpes corregido (N1)60

Profundidad	N60	σ (kPa)	u (kPa)	σ' (kPa)	Cn	(N1)60
1.5	6	27	5.89	21.11	1.70	10.20
2.5	7.5	45	15.70	29.30	1.70	12.75
3.5	5.25	63	25.51	37.49	1.64	8.62
4.5	15.3	81	35.32	45.68	1.49	22.75
5.5	8.5	99	45.13	53.87	1.37	11.64
6.5	15.2	117	54.94	62.06	1.28	19.39
7.5	10.45	135	64.75	70.25	1.20	12.53
8.5	18.05	153	74.56	78.44	1.13	20.48
9.5	14.25	171	84.37	86.63	1.08	15.39
10.5	26	189	94.18	94.82	1.03	26.83

En el siguiente paso se obtiene el valor de $N1_{60cs}$, el número de golpes por corrección de finos, esta será la última corrección realizada al número de golpes. A continuación, se muestra la fórmula para obtener el valor del $N1_{60cs}$:

$$N1_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60}$$

Donde:

- ✓ $\Delta(N_1)_{60}$: Ajuste equivalente para arena limpia

Idriss y Boulanger (2008) propusieron la siguiente ecuación para obtener el valor de $\Delta(N_1)_{60}$.

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

Con el uso de las dos fórmulas previamente planteadas se obtiene el valor de $N1_{60cs}$. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos.

Tabla 5

Cálculo de número de golpes corregido por finos N1 60cs

Profundidad	%Finos	(N1)60	ΔN160	$N1\ 60cs$
1.5	14	10.20	2.91	13.11
2.5	14	12.75	2.91	15.66
3.5	14	8.62	2.91	11.52
4.5	14	22.75	2.91	25.65
5.5	14	11.64	2.91	14.54
6.5	14	19.39	2.91	22.30
7.5	99	12.53	5.49	18.02
8.5	48	20.48	5.61	26.09
9.5	38	15.39	5.55	20.94
10.5	21	26.83	4.63	31.47

Como siguiente paso, obtenemos el esfuerzo cortante cíclico (CSR) y el esfuerzo resistente cíclico (CRR), los cuales permitirán calcular el factor de seguridad. A continuación, se muestran las ecuaciones a utilizar para el cálculo del CSR, CRR y el Factor de seguridad:

Para calcular el valor del CSR, se aplicó la metodología simplificada desarrollada por Seed e Idriss (1982), la cual sugiere el uso de la ecuación que se presenta a continuación:

$$CSR = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma'_v}{\sigma_v} r_d$$

Donde:

- ✓ CSR: Esfuerzo cortante cíclico
- ✓ σ_v: Esfuerzo total vertical a una profundidad específica
- ✓ σ'_v: Esfuerzo efectivo vertical a una profundidad específica
- ✓ $\frac{a_{max}}{g}$: Aceleración máxima horizontal expresada como una fracción de la gravedad
- ✓ r_d: Factor de reducción del esfuerzo cortante

El CSR para este caso de estudio fue obtenido de manera más precisa y rápida gracias al estudio de mecánica de suelos de la zona de estudio.

Para el cálculo del valor del esfuerzo resistente cíclico (CRR) se utilizó la siguiente fórmula:

$$CRR = CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm} \times MSF \times K_\sigma$$

Donde:

- ✓ MSF: Factor por escala de magnitud de sismo
- ✓ K_σ: Esfuerzo efectivo vertical en kPa
- ✓ $CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm}$: Esfuerzo efectivo cíclico para un momento de sismo Mw de 7.5 y un esfuerzo efectivo a 1 atm

Además, es importante indicar que Idriss y Boulanger (2008) establecieron la correlación entre $CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm}$ y el valor equivalente de arena limpia $N1_{60cs}$ para suelos sin cohesión, la cual se muestra representada por la siguiente fórmula:

$$CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm} = exp\left(\frac{N1_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{N1_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{N1_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{N1_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right)$$

Donde:

- ✓ $CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm}$: Esfuerzo efectivo cíclico para un momento de sismo Mw de 7.5 y un esfuerzo efectivo a 1 atm

Para este caso de estudio se utilizará el valor de $CRR_{MW=7.5,\sigma' v=1atm}$, ya que se está trabajando con una magnitud de momento sísmico de 7.5 (MW=7.5) y un esfuerzo efectivo a 1 atmósfera.

Finalmente, en este paso, se calculará el factor de seguridad, el cual resulta de la división de el valor del CRR sobre el valor obtenido para el CSR. A continuación, se muestra la fórmula para la obtención del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción (FS_{liq}).

$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR}$$

Donde:

- ✓ CSR: Esfuerzo cortante cíclico
- ✓ CRR: Esfuerzo efectivo cíclico
- ✓ FS_{liq}: Factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción

Con el uso de las fórmulas previamente planteadas se obtiene el valor del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción (FS_{liq}). A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos.

Tabla 6

Cálculo del Factor de seguridad

CSR	CRR(Mw=7.5)	FS_{liq}
0.348	0.141	0.40
0.440	0.162	0.37
0.471	0.129	0.27
0.495	0.306	0.62
0.510	0.152	0.30
0.520	0.238	0.46
0.527	0.184	2.00
0.530	0.318	2.00
0.528	0.218	2.00
0.520	0.594	1.14

Nota. Es importante destacar que los factores de seguridad obtenidos durante los primeros seis metros son menores a 1, lo cual indica que existe una alta probabilidad de que el suelo licúe; por ello, se propone la solución de mejora de columnas de grava.

Como penúltimo paso se procede a calcular la deformación cortante máxima (γ_{max}). Para ello también es necesario calcular el límite de la deformación cortante máxima (γ_{lim}) y los valores límite del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción (F_{α}).

A continuación, se muestran las fórmulas que permitirán calcular los valores antes descritos, la primera fórmula mostrada será la de la deformación cortante máxima (γ_{max}), la cual es calculada de acuerdo con las relaciones derivadas de Yoshimine et al. (2006):

$$\gamma_{max} = 0 \ , si \ \ FS_{liq} \geq 2$$

$$\gamma_{max} = \min\left(\gamma_{lim}, \frac{0.035\left(2 - FS_{liq}\right)(1 - F_{\alpha})}{FS_{liq} - F_{\alpha}}\right), si \ 2 > FS_{liq} > F_{\alpha}$$

$$\gamma_{max} = \gamma_{\lim}, si \ \ FS_{liq} \leq F_{\alpha}$$

Donde:

- ✓ γ_{max}: Deformación cortante máxima
- ✓ γ_{lim}: Límite de la deformación cortante máxima
- ✓ FS_{liq}: Factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción
- ✓ F_{α}: Valores límite del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción

En segundo lugar, se muestra la fórmula del límite de la deformación cortante máxima (γ_{lim}):

$$\gamma_{lim} = 1.859(1.1 - \sqrt{N1_{60cs}/46}))^3 \geq 0$$

Donde:

- ✓ $N1_{60cs}$: Número de golpes por corrección de finos
- ✓ γ_{lim}: Límite de la deformación cortante máxima

Finalmente, para este paso, se muestra la fórmula para obtener los valores límite del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción (F_{α}).

$$F_{\alpha} = 0.032 + 0.69\sqrt{N1_{60cs}} - 0.13(N1_{60cs}) \ ; \ N1_{60cs} \geq 7$$

Donde:

- ✓ F_{α}: Valores límite del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción

Con el uso de las fórmulas previamente planteadas se obtiene el valor de la deformación cortante máxima (γ_{max}). A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos.

Tabla 7

Cálculo de la deformación cortante máxima

Profundidad	$N1\,60cs$	γlim	Fa	γmax
1.5	13.11	0.3375	0.826	0.338
2.5	15.66	0.256	0.727	0.256
3.5	11.52	0.401	0.876	0.401
4.5	25.65	0.082	0.192	0.082
5.5	14.54	0.289	0.773	0.289
6.5	22.30	0.122	0.392	0.122
7.5	18.02	0.198	0.618	0.000
8.5	26.09	0.078	0.164	0.000
9.5	20.94	0.143	0.467	0.000
10.5	31.47	0.038	0.000	0.027

Nota. Finalmente se procede a calcular el asentamiento post-licuefacción; para ello, también es necesario calcular la deformación volumétrica de reconsolidación post-licuefacción (ε_v).

Por un lado, Ishihara y Yoshimine (1992) expresaron la deformación volumétrica vertical de reconsolidación post-licuefacción (ε_v) en términos de la resistencia a la penetración SPT de la siguiente forma:

$$\varepsilon_v = 1.5\exp\left(-0.369\sqrt{N1_{60cs}}\right) \times \min(0.08, \gamma_{max})$$

Donde:

- ✓ ε_v: Deformación volumétrica vertical de reconsolidación post-licuefacción
- ✓ γ_{max}: Deformación cortante máxima

Por otro lado, el asentamiento por reconsolidación post-licuefacción se estima según Idriss y Boulanger (2008) como una función de la deformación de reconsolidación post-licuefacción:

$$S_{v-1D} = \int_0^{z_{max}} \varepsilon_v d_z$$

Donde:

- ✓ S_{v-1D}: Asentamiento por reconsolidación post-licuefacción
- ✓ d_z: Espesor de las capas de suelo

Con el uso de las fórmulas previamente planteadas se obtiene el valor de la deformación volumétrica vertical de reconsolidación post-licuefacción (ε_v) y el valor del asentamiento post-licuefacción (S_{v-1D}). A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos.

Tabla 8

Cálculo del asentamiento pot-licuefacción antes de la mejora

Profundidad	$N1\,60cs$	FS	γmax	εv	h (m)	S_{v-1D} (cm)
1.5	13.11	0.40	0.338	0.032	1	3.155
2.5	15.66	0.37	0.256	0.028	1	2.787
3.5	11.52	0.27	0.401	0.034	1	3.429
4.5	25.65	0.62	0.082	0.019	1	1.851
5.5	14.54	0.30	0.289	0.029	1	2.938
6.5	22.30	0.46	0.122	0.021	1	2.101
7.5	18.02	2.00	0.000	0.000	1	0.000
8.5	26.09	2.00	0.000	0.000	1	0.000
9.5	20.94	2.00	0.000	0.000	1	0.000
10.5	31.47	1.14	0.027	0.005	1	0.000

Nota: El asentamiento unidimensional por deformación volumétrica vertical total post-licuefacción resulta en un valor de 16.26 cm.

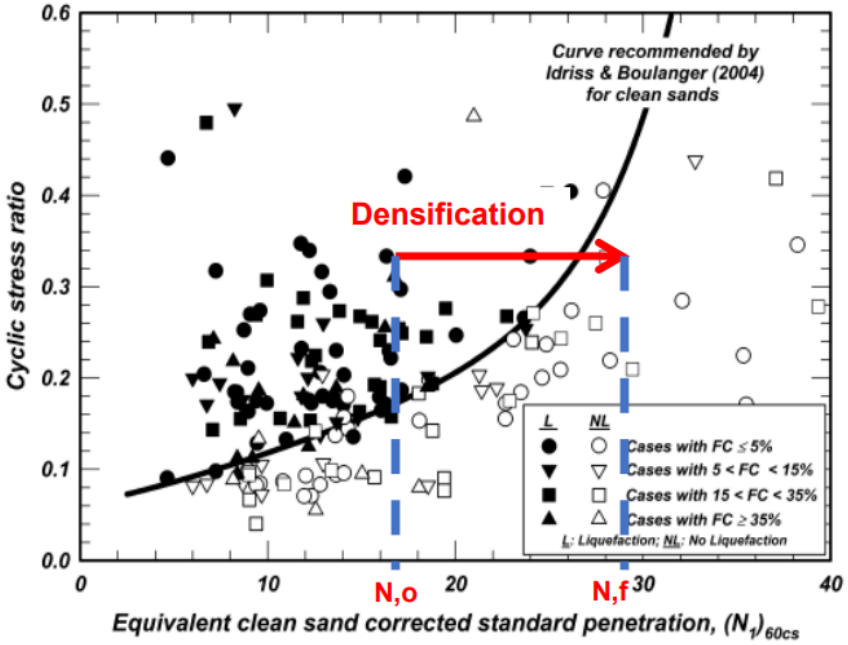
Es importante destacar que el alcance de este caso de estudio se centra en los asentamientos post-licuefacción por deformación volumétrica vertical. Los asentamientos post-licuefacción por reducción de capacidad portante y por flujo o venteo de arena (volcanes de arena) no forman parte del alcance del caso de estudio.

3.2.5.2 Cálculo de asentamientos Post-Licuefacción después de la mejora

Las tablas utilizadas antes de la mejora son utilizadas nuevamente; sin embargo, se presentan algunos cambios, los cuales se irán detallando en el desarrollo de este apartado. En primer lugar, gracias a la densificación del suelo con las columnas de grava y con la evaluación de porcentaje de finos existentes se calcula un número de golpes adicionales (ΔN) con respecto a la propuesta antes de la mejora.

Figura 14

Incremento de número de golpes



Nota. De "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", por Idriss y Boulanger, 2004 (https://www.marchetti-dmt.it/wp-content/uploads/bibliografia/idriss_2004_semi_empirical_procedures_for_liquef.pdf).

Para nuestro caso de estudio del primer ensayo SPT se ha considerado un $\Delta N = 8$, ya que el porcentaje de finos hasta los 6 metros es de 14%. De esta manera se obtuvieron nuevos valores para el número de golpes, lo cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 9

Nuevo número de golpes (Nspt) debido a la mejora

Profundidad	Nspt	SUCS	%finos	ΔN	Nuevo Nspt
1.5	8	SM	14	8	16
2.5	10	SM	14	8	18
3.5	7	SM	14	8	15
4.5	18	SM	14	8	26
5.5	10	SM	14	8	18
6.5	16	SM	14	8	24
7.5	11	Arcilla	99		11
8.5	19	Arcilla	48		19
9.5	15	Arcilla	38		15
10.5	26	SM	21		26

Como segundo paso se calculará el diámetro de las columnas de grava según el Nspt, La siguiente tabla muestra la relación de número de golpes (Nspt) y el diámetro de la columna.

Tabla 10

Diámetro estimado de las columnas de grava considerando el NSPT

NSPT	D col. (cm)
<4	>1
6	0.85
8	0.75
>10	0.65

Nota. De "Avances en el diseño y cálculo de columnas de grava. Parte II: Grupos de columnas y consolidación secundaria", por Castro, 2021 (https://doi.org/10.3989/ic.71912).

Para este caso de estudio del primer ensayo SPT se ha considerado un diámetro de 0.65 cm para las columnas de grava. Además, se considera un espaciamiento de 2 m, el cual abarca un área tributaria de 4 m2. Estos datos, permiten calcular la relación de áreas R_a que es un parámetro determinante en el uso de columnas de grava, esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R_a = \frac{A_c}{A_t}$$

Donde:

- ✓ R_a: Relación de áreas de la columna y área tributaria
- ✓ A_c: Área de la columna
- ✓ A_t: Área tributaria

A continuación, se muestra una tabla resumen con todos los datos preliminares antes mencionados:

Tabla 11

Parámetros preliminares para el diseño de la propuesta

Diámetro (m)	Espaciamiento (m)	A_c (m2)	A_t (m2)	Ra	Profundidad (m)
0.65	2	0.33	4	0.083	6

Nota. La relación de áreas (Ra) supera el 8%, lo cual también valida el ΔN propuesto en la tabla 9, ya que se toma en cuenta que para la validación del ΔN la relación de áreas debe ser mayor a un valor de aproximadamente entre el 3% y 4%.

Luego de seguir estos primeros pasos, se procede a realizar los mismos cálculos que se realizaron para este caso de estudio antes de la mejora planteada. A continuación, se muestra una tabla resumen con los nuevos valores obtenidos hasta el esfuerzo efectivo cíclico (CRR).

Tabla 12

Nuevos parámetros obtenidos después de la mejora

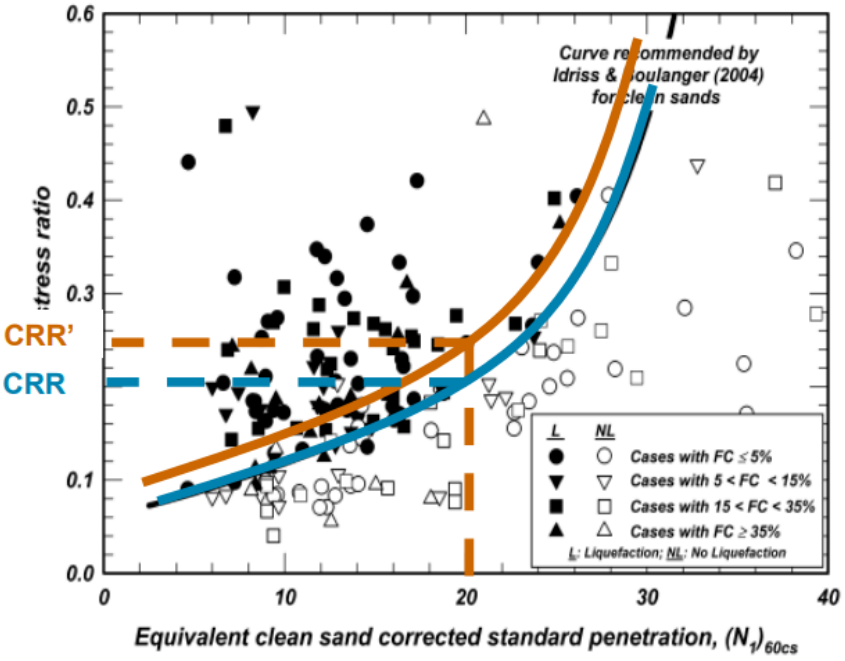
Profundidad	$N1\ 60cs$	CRR(Mw=7.5)
1.5	23.31	0.255
2.5	25.86	0.312
3.5	21.37	0.224
4.5	35.77	1.307
5.5	23.85	0.265
6.5	31.99	0.643
7.5	18.02	0.184
8.5	26.09	0.318
9.5	20.94	0.218
10.5	31.47	0.594

Nota. La tabla muestra los nuevos valores del número de golpes por corrección de finos ($N1_{60cs}$) y el esfuerzo efectivo cíclico (CRR).

Como siguiente paso, se calcula el nuevo CRR aumentado. Este se obtiene si hay incremento de esfuerzo lateral, el cual produce incremento del coeficiente de empuje lateral (K_0) que a su vez incrementa el CRR original en un 20%.

Figura 15

Incremento de esfuerzo lateral



Nota. De "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test", por Idriss y Boulanger, 2004 (https://www.marchetti-dmt.it/wp-content/uploads/bibliografia/idriss_2004_semi_empirical_procedures_for_liquef.pdf).

Para nuestro caso de estudio el coeficiente de empuje lateral (K_0) aumenta hasta los 6 metros, distancia propuesta para la profundidad de la columna de grava. A continuación, se muestra una tabla resumen con el nuevo CRR aumentado en un 20%.

Tabla 13

CRR aumentado, debido al aumento del coeficiente de empuje lateral

CRR(Mw=7.5)	Incremento de K0	CRR' (aumentado 20%)
0.255	SI	0.306
0.312	SI	0.374
0.224	SI	0.269
1.307	SI	1.568
0.265	SI	0.318
0.643	SI	0.772
0.184		0.184
0.318		0.318
0.218		0.218
0.594		0.594

Luego se procede a calcular el nuevo factor de seguridad, el cual es calculado de la misma manera en la que se obtuvo antes de la mejora; es decir, de la división del CRR aumentado y el CSR que no sufrió modificaciones.

La siguiente tabla resumen muestra este nuevo factor de seguridad:

Tabla 14

Cálculo del nuevo Factor de seguridad

CSR	CRR' (aumentado 20%)	FS_{liq}
0.348	0.306	0.88
0.440	0.374	0.85
0.471	0.269	0.57
0.495	1.568	3.17
0.510	0.318	0.62
0.520	0.772	1.49
0.527	0.184	2.00
0.530	0.318	2.00
0.528	0.218	2.00
0.520	0.594	1.14

Como siguiente paso se procede a calcular la nueva deformación cortante máxima (γ_{max}). Para ello también es necesario calcular el nuevo límite de la deformación cortante máxima (γ_{lim}) y los nuevos valores límite del factor de seguridad contra el desencadenamiento de la licuefacción (F_{α}). Para hallar estos nuevos valores se utilizan las mismas fórmulas aplicadas antes de la propuesta de mejora.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los nuevos valores de los parámetros antes mencionados:

Tabla 15

Cálculo de la nueva deformación cortante máxima

Profundidad	$N1\,60cs$	γlim	$F\alpha$	γmax
1.5	23.31	0.1088	0.333	0.048
2.5	25.86	0.0799	0.179	0.049
3.5	21.37	0.1362	0.444	0.136
4.5	35.77	0.0193	0.000	0.000
5.5	23.85	0.1019	0.301	0.102
6.5	31.99	0.0350	0.000	0.013
7.5	18.02	0.1981	0.618	0.000
8.5	26.09	0.0776	0.164	0.000

9.5	20.94	0.1430	0.467	0.000
10.5	31.47	0.0378	0.000	0.027

Luego se procede a calcular el nuevo asentamiento post-licuefacción; para ello, también es necesario calcular la deformación volumétrica de reconsolidación post-licuefacción (ε_v), estos parámetros se calcularán de la misma manera en la que se obtuvieron antes de la mejora.

Tabla 16

Cálculo del nuevo asentamiento post-licuefacción

Profundidad	$\boldsymbol{\varepsilon v}$	**h (m)**	$\boldsymbol{S_{v-1D}}$ **(cm)**
1.5	0.012	1	1.21
2.5	0.011	1	1.13
3.5	0.022	1	2.18
4.5	-0.003	1	0.00
5.5	0.020	1	1.98
6.5	0.002	1	0.00
7.5	0.000	1	0.00
8.5	0.000	1	0.00
9.5	0.000	1	0.00
10.5	0.005	1	0.00

Nota: El nuevo asentamiento unidimensional por deformación volumétrica vertical total post-licuefacción resulta en un valor de 6.50 cm.

Finalmente, para el cálculo del asentamiento final (S_{final}), se utilizará el módulo de elasticidad de la columna de grava (E_{CG}), el módulo de elasticidad del suelo afectado por la licuación (E_{liq}) y el módulo de elasticidad compuesto (E_{comp}).

En condiciones iniciales el módulo de elasticidad de la columna de grava se considera en 170 MPa; sin embargo, al considerar los efectos de la licuación, se podría reducir a una cuarta parte de este valor:

$$E_{CG} = \frac{E_{CG_i}}{4}$$

Donde:

- ✓ E_{CG_i}: Módulo de elasticidad de la columna de grava en condiciones normales
- ✓ E_{CG}: Módulo de elasticidad de la columna de grava bajo efecto de licuefacción

Por lo tanto, según la ecuación mostrada, el módulo de elasticidad de la columna de grava a utilizar en condiciones afectadas por la licuefacción es de 43 Mpa.

En el caso del módulo de elasticidad del suelo afectado por la licuación (E_{liq}), se presenta la siguiente fórmula:

$$E_{liq} = 0 \; ; \; si \; S_{v-1D} = 0$$

$$E_{liq} = \left(\frac{\sigma'(Kpa)}{1000} \times h\right) / \left(\frac{S_{v-1D}}{100}\right)$$

Donde:

- ✓ E_{liq}: Módulo de elasticidad del suelo afectado por la licuefacción
- ✓ $\sigma'(Kpa)$: Esfuerzo efectivo vertical en KPa
- ✓ S_{v-1D}: Asentamiento post-licuefacción después de la mejora

Para el caso del módulo de elasticidad compuesto (E_{comp}), se presenta la siguiente fórmula:

$$E_{comp} = (E_{CG} \times R_a) + \left(E_{liq} \times (1 - R_a)\right)$$

Donde:

- ✓ E_{comp}: Módulo de elasticidad compuesto
- ✓ R_a: Relación de áreas de la columna y área tributaria

Finalmente, para el cálculo del asentamiento final se presenta la siguiente ecuación:

$$S_{final} = 0 \; ; \; si \; S_{v-1D} = 0$$

$$S_{final} = (\sigma' \times h) / \left(E_{comp} \times 1000\right)$$

Donde:

- ✓ S_{final}: Asentamiento final por deformación volumétrica vertical post-licuefacción después de la mejora

Es importante resaltar que este caso de estudio posee una cimentación conformada por zapatas; por ello, el asentamiento final post-licuefacción después de la mejora no debe

exceder el valor de 1'' o 2.54cm, ya que Alva (2011) indica que usualmente para las zapatas de edificios comerciales se especifica un asentamiento admisible de 1 pulgada.

A continuación, se muestra una tabla resumen con todos los valores de los parámetros antes descritos:

Tabla 17

Cálculo del asentamiento final post-licuefacción por deformación volumétrica vertical

E_{CG} (MPa)	E_{liq} (MPa)	E_{comp} (MPa)	S_{final}
43	1.7	5.2	0.4
43	2.6	5.9	0.5
43	1.7	5.1	0.7
43	0.0	3.6	0.0
43	2.7	6.1	0.9
43	0.0	3.6	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

Nota: El nuevo asentamiento por deformación volumétrica vertical final total post-licuefacción después de la mejora resulta en un valor de 2.52 cm. Cabe resaltar que este resultado pertenece únicamente a una zona de estudio, en este caso el punto WB-09.

3.3 Validación del Proyecto

Uno de los principales objetivos de esta investigación es disminuir significativamente los asentamientos totales en suelos licuables mediante la implementación de columnas de grava. En el caso específico del muestreo WB-09, los datos obtenidos antes de la intervención revelan un asentamiento total de 16.26 cm en la zona de estudio. Sin embargo, con la implementación de la solución de mejora propuesta, este asentamiento se reduce de manera considerable a 2.52 cm, aproximadamente en un 75%. Este resultado respalda la efectividad de la propuesta de reforzar el suelo mediante columnas de grava con una profundidad de 6 metros, un diámetro de 0.5 metros y un espaciamiento de 2.5 metros.

Para validar aún más la eficacia de esta metodología, se realizaron los mismos procedimientos de cálculo de asentamientos post-licuación se aplicaron a los muestreos WB-10, WB-11 y WB-12.

Tabla 18

Asentamiento total punto de inspección WB-10

E_{CG} (MPa)	E_{liq} (MPa)	E_{comp} (MPa)	S_{final}
43	2.0	4.2	0.5
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
Asentamiento total (cm)			0.5

Tabla 19

Asentamiento total punto de inspección WB-11

E_{CG} (MPa)	E_{liq} (MPa)	E_{comp} (MPa)	S_{final}
43	0.8	3.1	0.7
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	7.3	6.9	1.30
Asentamiento total (cm)			1.94

Tabla 20

Asentamiento total punto de inspección WB-11

E_{CG} (MPa)	E_{liq} (MPa)	E_{comp} (MPa)	S_{final}
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
43	0.0	2.3	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

	4.4	4.2	2.10
Asentamiento total (cm)			2.08

En los 4 puntos, se obtuvieron resultados favorables que confirman el éxito de la solución de mejora de suelos licuables con la implementación de columnas de grava en distintas zonas de estudio.

Tabla 21

Mejora de asentamiento con implementación de columnas de grava en puntos de estudio

Muestreo	Asentamiento post-licuación	Asentamiento con columnas de grava
WB-9	16.26	2.52
WB-10	5.70	0.50
WB-11	6.40	1.94
WB-12	8.07	2.08

Nota. Los resultados detallados evidencian la consistencia de la reducción de asentamientos lograda mediante esta técnica innovadora: implementación de columnas de grava en suelos potencialmente licuables en zonas costeras del Perú.

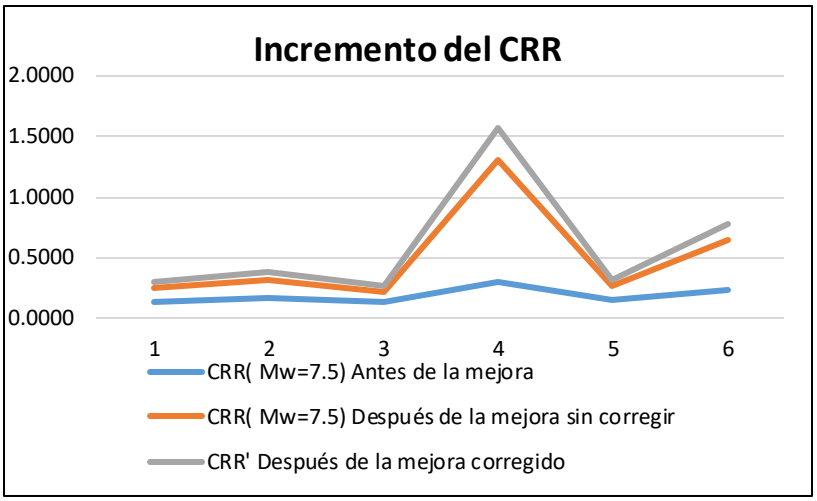
3.4 Interpretación de los Resultados

Según los resultados obtenidos, se muestra una amplia reducción de los asentamientos por licuefacción gracias a la implementación de las columnas de grava, ya que se reduce de un asentamiento total de 13.48 cm a un valor de 0.85 cm. Además, debido a que las cimentaciones de la zona de estudio son zapatas, el valor esperado de asentamiento con la implementación de la propuesta debe ser menor a 1” o 2.54 cm, requisito que es validado por el asentamiento total obtenido de 0.85 cm, el cual es ampliamente menor al valor base.

A continuación, se muestran 3 gráficos representativos, los cuales reflejan los principales hallazgos de este caso de estudio. En primer lugar, se muestra el incremento del esfuerzo efectivo cíclico (CRR), el cual presenta un incremento notable en los 6 metros de mejoras planteados. En la figura 16 se muestra este incremento para los tres casos calculados: antes de la mejora, después de la mejora sin corregir y después de la mejor corregido (incremento del 20%).

Figura 16

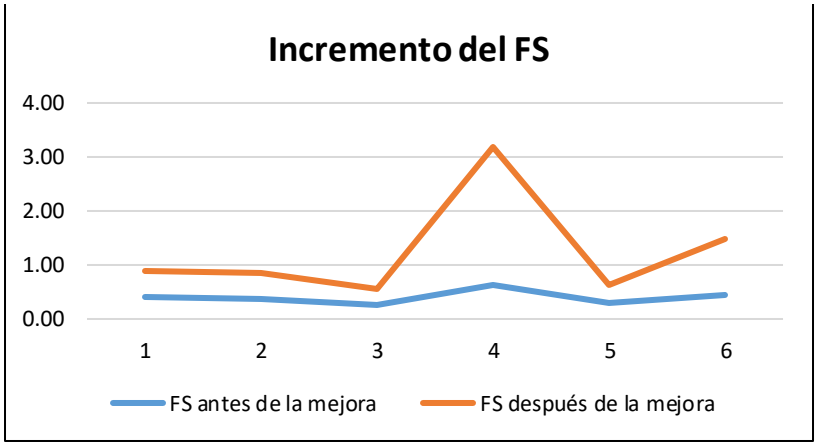
Incremento del esfuerzo efectivo cíclico (CRR)



En segundo lugar, se muestra el incremento del factor de seguridad en los 6 metros de profundidad de mejora. El valor más notable de cambio es el aumento del valor de 0.62 a 3.17, lo cual representa un aumento aproximadamente del 400%. Estos resultados se muestran en la figura 17:

Figura 17

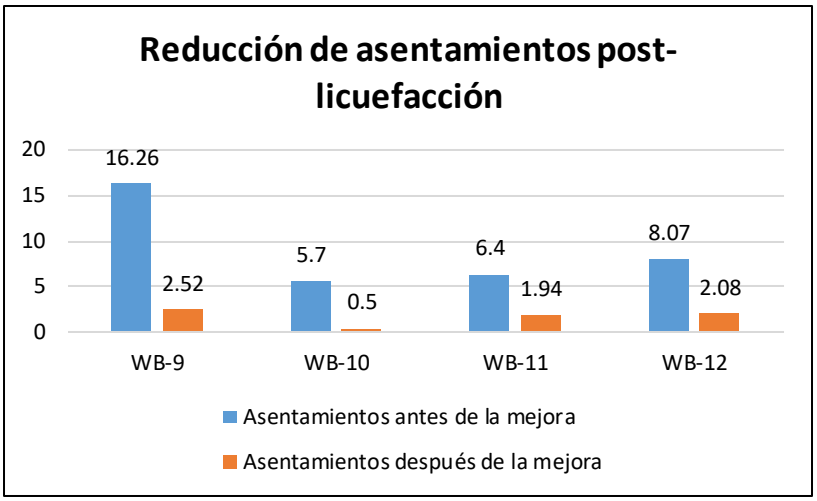
Incremento del factor de seguridad (FS)



Finalmente, se muestra la reducción de los asentamientos totales unidimensionales por deformación volumétrica vertical post-licuefacción para los cuatro ensayos SPT. El valor más notable de cambio es la reducción del valor de 16.26 cm a 2.52 cm, lo cual representa una reducción aproximadamente del 75%, además de cumplir con el asentamiento admisible de 1 pulgada.

Figura 18

Reducción de asentamientos post-licuefacción



4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- ✓ El proyecto planteó mejorar los asentamientos y factores de seguridad de un suelo potencialmente licuable en la región Tumbes, el cual iba a soportar un supermercado, a través de la implementación de suelos de grava; teniendo así una mejora significativa de asentamiento en los 4 puntos de estudio planteados.

- ✓ La implementación de columnas de grava ha demostrado ser altamente eficaz en disminuir significativamente los asentamientos post-licuefacción en suelos costeros licuables. En el punto de estudio más crítico, WB-9, los asentamientos se redujeron de un valor inicial de 16.26 cm a 2.52 cm, cumpliendo con los límites admisibles para edificaciones en zonas de actividad sísmica. Esto confirma que la técnica permite mejorar la estabilidad de la estructura y mitigar el riesgo de daños significativos tras un evento sísmico

- ✓ Los resultados en diversos puntos de estudio (WB-9, WB-10, WB-11 y WB-12) mostraron una reducción uniforme en los asentamientos post-licuefacción, lo que evidencia la confiabilidad y efectividad de la técnica de columnas de grava. Esta uniformidad en la reducción de asentamientos en los diferentes puntos de análisis valida la propuesta como una solución adecuada para mitigar el riesgo de licuefacción en suelos arenosos saturados en la región de Tumbes y otras zonas costeras con características geotécnicas similares.

- ✓ La técnica de columnas de grava no solo reduce los asentamientos, sino que también contribuye a la consolidación del suelo a través de un aumento en su capacidad portante. Este método se confirma como una solución de bajo costo y efectiva para áreas de alto riesgo sísmico, particularmente en zonas costeras. La consolidación adicional lograda por esta técnica proporciona una base más estable para las construcciones, optimizando la durabilidad y seguridad de las infraestructuras esenciales como supermercados y almacenes, que juegan un papel crucial en la economía y en el bienestar de las comunidades locales

4.2 Recomendaciones

- ✓ Al momento de diseñar columnas de grava se debe definir como parámetros iniciales la configuración de la red y la distancia entre los elementos. Además, se debe tener en cuenta la asignación propuesta y el tiempo necesario para alcanzar el nivel requerido de integración.

- ✓ La evaluación de asentamientos y factores de seguridad debe realizarse mediante software especializado y ensayos de penetración estándar (SPT), lo cual permite obtener resultados precisos y ajustar el diseño de mejora del suelo de acuerdo con las necesidades del proyecto.

- ✓ Se aconseja definir cuidadosamente el espaciamiento y la profundidad de las columnas de grava, adaptándolos a las condiciones del suelo y los requisitos específicos de cada proyecto.

- ✓ Dado que la estabilidad de las estructuras depende de la durabilidad de la mejora del suelo, se recomienda realizar un monitoreo continuo del rendimiento del suelo tratado, especialmente en proyectos en áreas de alta actividad sísmica. Este monitoreo permitirá verificar que los asentamientos post-licuefacción se mantengan dentro de los límites establecidos a lo largo del tiempo, garantizando que el suelo conserve las mejoras alcanzadas y mantenga la seguridad de las estructuras

- ✓ Para optimizar el uso de columnas de grava en suelos licuables, es fundamental llevar a cabo un análisis geotécnico detallado, con el objetivo de ajustar los parámetros de diseño, tales como el espaciamiento y la profundidad de las columnas, a las características específicas del suelo y a las condiciones sísmicas de la zona del proyecto. La personalización de estos parámetros garantiza que el diseño cumpla con los requisitos de estabilidad y maximice la reducción de asentamientos, logrando así la seguridad estructural deseada

5 REFERENCIAS

Alva, J. E. (2011). *Diseño de cimentaciones*. (1a ed.) Guzlo editoras.

Alva, J., & Ortiz, C. (2020). Update on the ocurrence of the soil liquefaction phenomenon in Peru. *TECNIA*, *30*(2), 6–17. https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i2.756

Anusch, J. (2017). *Comportamiento sísmico de taludes sobre suelos potencialmente licuables mejorados mediante columnas de grava*.

Araki, H. (2024). Effects of liquefaction countermeasure using buried gabion installed to shallow foundations. *International Journal of GEOMATE*, *26*(118), 65–73. https://doi.org/10.21660/2024.118.4390

Bautista, D., & Mayorga, E. (2018). *Análisis del mejoramiento de suelos empleando el método de columnas de grava*.

Bellido, J., & Camayo, Y. (2022). *Análisis del potencial de licuación para mejorar los suelos arenosos en el sector de Lomo De Corvina - Villa el Salvador*.

Boulanger, R., & Idriss, I. (2004). *Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays*.

Carvajal, E., Ruiz-Terán, P., Keller Cimentaciones, & Ferrovial Construccción. (2015). *Métodos de ejecución de columnas de grava y su influencia en el suelo mejorado*.

CENEPRED. (2020). *Escenario de riesgo por sismo de gran magnitud seguido de tsunami frente a la costa central del Perú*. www.cenepred.gob.pe

D. Bray, J., D. O'Rourke, T., D. Zupan, J., Jeon, S.-S., Toprack, S., Hughes, M., Sjoerd van Ballegooy, & Bouziou, D. (2013). *Liquefaction impact on critical infrastructure in Christchurch*. https://www.researchgate.net/publication/277344291

Flores, A., Arroyo, F., De La Fuente, L, Bernal, H. & Aguirre, J. (2022). Mitigación del riesgo de licuación en tanques de almacenamiento mediante Columnas de Grava Compactada. *XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*.

GEOPIER. (2016). Proper load testing procedures to verify adequate design of geopier supported foundation systems. In *GEOPIER*.

Idriss I.M. & Boulanger R.W. (2008). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.

Liang, X., Chen, P., Qiu, Q., Wang, J., & Zhu, M. (2021). Research on Integrated Liquefaction Assessment for Stone Column Applied in Coral Sand Area within High Earthquake Magnitude Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *638*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/638/1/012077

Meneses, S. (2019). *Análisis de Sistemas de Micropilotes para su uso en suelos licuables*. Universidad de Chile.

Ndoj, A., & Hajdari Veronika. (2014). Evaluation of Post-liquefaction Reconsolidation Settlement based on Standard Penetration Tests (SPT). In *AlketaNdoj Int. Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com* (Vol. 4, Issue 11). www.ijera.com

Niroumand, B., & Niroumand, H. (2022). Gravel impact compaction piers as a method of soil improvement. *Revista de La Construccion*, *21*(3), 539–554. https://doi.org/10.7764/RDLC.21.3.539

Ortiz, E., Chunga, K., Toulkeridis, T., & Pastor, J. L. (2022). Soil Liquefaction and Other Seismic-Associated Phenomena in the City of Chone during the 2016 Earthquake of Coastal Ecuador. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/app12157867

Poves, J. (2017). *Influencia de las columnas de grava compactada en el asentamiento de suelos blandos, sector de Palian*. Universidad Nacional del Centro del Perú.

Youd, T., Idriss, I., Andrus, R., Arango, I., Castro, G., Christian, J., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson, W., Martin, G., Mitchell, J., Moriwaki, Y., Power, M., Robertson, P., … Stokoe, K. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *127*(10), 817–833. https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:10(817)