



**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Técnicas de mejoramiento en suelos arenosos para mitigar los efectos de la  
licuefacción en el distrito de Chorrillos

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

**AUTORES**

Huaytalla Moreno, Jose Manuel  
ORCID: 0000-0002-0739-3674

Valenzuela Choque, Joshua Bladimir  
ORCID: 0000-0002-2955-8468

**ASESOR**

Torres Chung, César Roberto  
ORCID: 0000-0002-3212-2817

**Lima, Perú**

**2022**

## **Metadatos Complementarios**

### **Datos de los autores**

Huaytalla Moreno, Jose Manuel

DNI: 70028504

Valenzuela Choque, Joshua Bladimir

DNI: 74469695

### **Datos de asesor**

Torres Chung, César Roberto

DNI: 41182279

### **Datos del jurado**

#### **JURADO 1**

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

#### **JURADO 2**

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

#### **JURADO 3**

Chavarria Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

ORCID: 0000-0002-1759-2132

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres y familiares,  
por su apoyo y su guía.

Jose Manuel Huaytalla Moreno

Dedicado a mis padres, mi abuela y  
mis tíos, por su dedicación y apoyo  
en mi vida y formación académica.

Joshua Bladimir Valenzuela

Choque

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestra alma mater por habernos  
brindado los conocimientos de esta  
maravillosa carrera

Al Mg. Cesar Torres Chung, por la  
asesoría técnica brindada en esta  
investigación y los consejos  
académicos necesarios para la  
concretización de esta tesis.

Jose Huaytalla y Joshua Valenzuela

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>iii</b>
<b>CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	1
1.1.1. Problema e importancia.....	1
1.1.2. Árbol del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos .....	2
1.3. Objetivos de la investigación.....	2
1.3.1. Objetivo general .....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Delimitación de la investigación .....	3
1.4.1. Geográfica .....	3
1.4.2. Temporal .....	3
1.4.3. Temática .....	3
1.4.4. Muestral.....	3
1.5. Justificación del estudio.....	3
1.5.1. Conveniencia.....	3
1.5.2. Relevancia social.....	3
1.5.3. Aplicaciones prácticas .....	4
1.5.4. Utilidad metodológica .....	4
1.5.5. Valor teórico.....	4
1.6. Importancia del estudio.....	4
1.6.1. Nuevos conocimientos .....	4
1.6.2. Aporte.....	5
1.7. Limitaciones del estudio .....	5
1.7.1. Metodológicos o prácticos .....	5
1.7.2. Medidas para la recolección de los datos .....	5
1.7.3. Obstáculos de la investigación .....	5
1.8. Alcance .....	5

1.9. Viabilidad del estudio .....	6
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. Marco histórico .....	7
2.2. Investigaciones relacionadas con el tema .....	10
2.2.1. Investigaciones nacionales e internacionales .....	10
2.2.2. Artículos relacionados con el tema .....	12
2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	13
2.3.1. Licuación en suelos arenosos .....	13
2.3.2. Columna de grava.....	13
2.3.3. Inclusiones rígidas.....	15
2.3.4. Jet Grouting .....	15
2.3.5. Capacidad drenante .....	16
2.3.6. Presión de poros .....	17
2.3.7. Capacidad portante .....	17
2.3.8. Asentamientos en cimentaciones .....	18
2.3.9. Asentamiento por sismo .....	19
2.3.10. Capacidad de carga por sismo.....	20
2.3.11. Método de Priebe .....	20
2.3.12. Metodología Asiri .....	22
2.3.13. Metodología Karahan & Sivrikaya .....	22
2.3.14. Características sísmicas de la zona .....	23
2.3.15. Características geológicas de la zona.....	25
2.3.16. Riesgo sísmico .....	26
2.3.17. Tipos de cimentaciones superficiales.....	27
2.4. Definición de términos básicos.....	31
<b>CAPÍTULO 3: SISTEMA DE HIPÓTESIS.....</b>	<b>33</b>
3.1. Hipótesis general .....	33
3.2. Hipótesis específicas.....	33
3.3. Variables .....	33
3.3.1. Variable dependiente .....	33
3.3.2. Variable independiente.....	33
3.4. Operacionalización de la variable.....	33
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA .....</b>	<b>35</b>
4.1. Método de la investigación .....	35

4.1.1. Método .....	37
4.1.2. Orientación .....	38
4.1.3. Enfoque .....	38
4.1.4. Instrumento de recolección de datos .....	38
4.2. Tipo de la investigación .....	38
4.3. Nivel de la investigación .....	39
4.4. Diseño de la investigación .....	39
4.5. Población y muestra.....	39
4.5.1. Población.....	39
4.5.2. Muestra.....	39
4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	40
4.6.1. Instrumentos de recolección de datos.....	40
4.6.2. Métodos y técnicas .....	41
4.7. Descripción de la recolección de datos.....	41
<b>CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LAS TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO .....</b>	<b>42</b>
5.1. Descripción del proyecto .....	42
5.2. Análisis de asentamiento por sismo.....	44
5.3. Diseño de la Columna de grava .....	48
5.4. Diseño de las Inclusiones rígidas.....	51
5.5. Diseño del Jet Grouting .....	60
<b>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 7: CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....</b>	<b>68</b>
7.1. Contrastación de la hipótesis general .....	68
7.2. Contrastación de las hipótesis específicas .....	68
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo 1: Matriz de consistencia .....</b>	<b>78</b>
<b>Anexo 2: Matriz de Operacionalización .....</b>	<b>79</b>
<b>Anexo 3: Calicata E44 .....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo 4: Calicata E46 .....</b>	<b>81</b>
<b>Anexo 5: Tabla de Pesos Unitarios, Ang. Fricción y Cohesión.....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo 6: Tabla de Ángulos de Fricción y Cohesión. ....</b>	<b>83</b>

<b>Anexo 7: Tabla de factores de carga. ....</b>	<b>84</b>
--	-----------

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de la variable.....	34
Tabla 2 Resumen Tipología de otros autores.....	37
Tabla 3 Técnicas de mejoramiento para diferentes suelos. ....	40
Tabla 4 Promedio para la capa Arena fina Limosa-Densa .....	43
Tabla 5 Parámetros evaluados para la determinación del peligro por sismo.....	47
Tabla 6 Características iniciales .....	48
Tabla 7 Características de diseño para la columna de gravas. ....	49
Tabla 8 Datos para el diseño de columna triangular (suelo – grava).....	49
Tabla 9 Resultados del método de Priebe.....	51
Tabla 10 Datos para el cálculo de las tensiones.....	54
Tabla 11 Valores recomendados para el parámetro $K_{tan\delta}$ .....	55
Tabla 12 Valores de $CC$ y $e_0$ para suelos. ....	58
Tabla 13 Características de las Columnas de Jet Grouting.....	60
Tabla 14 Datos para el Diseño del Jet Grouting. ....	61
Tabla 15 Datos para el cálculo del Asentamiento.....	64
Tabla 16 Módulo de elasticidad del suelo tratado por Jet Grouting. ....	64
Tabla 17 Comparación de las técnicas de mejoramiento.....	67
Tabla 18 Contrastación de las hipótesis.....	69

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol del problema.....	2
Figura 2. Mapa de recolección de zonas de licuación. ....	8
Figura 3. Ejemplos de licuefacción en el Perú.....	10
Figura 4. Maquina vibratoria para la técnica de Vibro sustitución.....	14
Figura 5. Colocación de las columnas de grava.....	14
Figura 6. Proceso constructivo de Inclusiones rígidas.....	15
Figura 7. Sistema Super Jet Grouting. ....	16
Figura 8. Falla por corte general. ....	17
Figura 9. Falla por punzonamiento. ....	18
Figura 10. Falla por corte local. ....	18
Figura 11. Variación de $\tan\alpha_{AE}$ con $K_h$ y ángulo de fricción del suelo $\phi$ . ....	19
Figura 12. Superficie de falla estática y dinámica. ....	20
Figura 13. Ábaco para el diseño de columnas de grava.....	21
Figura 14. Mapa de microzonificación sísmica de Chorrillos. ....	24
Figura 15. Mapa de microzonificación geotécnica de Chorrillos.....	25
Figura 16. Mapa de Uso de suelo de Chorrillos .....	27
Figura 17. Asentamiento diferencial.....	28
Figura 18. Límites de Distorsión angular .....	28
Figura 19. Zapatas aisladas .....	29
Figura 20. Zapatas conectadas .....	29
Figura 21. Platea de Cimentación .....	30
Figura 22. Pilote.....	30
Figura 23. Detalle de instalación de Anclaje .....	31
Figura 24. Estudios de suelo con calicatas en La Encantada.....	42
Figura 25. Estratigrafía del suelo del proyecto. ....	44
Figura 26. Microzonificación sísmica-geotécnica para Lima Metropolitana y Callao...	46
Figura 27. Obtención del valor de $\tan\alpha_{AE}$ . ....	47
Figura 28. Espaciamiento de las columnas de grava. ....	49
Figura 29. Altura de la capa de transferencia. ....	52
Figura 30. Formación del ángulo pirámide invertida. ....	52
Figura 31. Formación cuadrada de las inclusiones rígidas. ....	53

Figura 32. Obtención del factor $\lambda$ .....	55
Figura 33. Obtención del coeficiente $mr$ .....	56
Figura 34. Cálculo del $mr_0, bR$ .....	57
Figura 35. Altura de la capa licuable.....	58
Figura 36. Sistema Super Jet Grouting de doble boquilla. ....	60
Figura 37. Columna de Jet Grouting en el suelo del proyecto.....	62

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Asentamiento de cimentación debido a sismo. ....	19
Ecuación 2: Coeficiente de intensidad sísmica. ....	47
Ecuación 3: Diámetro equivalente. ....	50
Ecuación 4: Área de influencia de la celda unitaria. ....	50
Ecuación 5: Razón de sustitución. ....	50
Ecuación 6: Índice de área. ....	50
Ecuación 7: Factor de mejora del suelo. ....	50
Ecuación 8: Función de influencia. ....	50
Ecuación 9: Coeficiente de empuje activo de la columna. ....	50
Ecuación 10: Asentamiento reducido. ....	51
Ecuación 11: Altura de la capa de transferencia. ....	53
Ecuación 12: Peso de la capa de reparto soportada por las inclusiones. ....	53
Ecuación 13: Carga actuante soportada por las inclusiones. ....	54
Ecuación 14: Tensión vertical entre inclusiones en la capa de transferencia. ....	56
Ecuación 15: Tensión efectiva vertical medio a la longitud hm. ....	57
Ecuación 16: Asentamiento de la capa de transferencia. ....	58
Ecuación 17: Asentamiento producido en la capa de suelo licuable. ....	59
Ecuación 18: Factor de forma 1. ....	61
Ecuación 19: Factor de forma 2. ....	61
Ecuación 20: Tensión geológica efectiva. ....	62
Ecuación 21: Coeficiente de presión horizontal del suelo en la columna. ....	63
Ecuación 22: Componente de la superficie en la punta final de la columna. ....	63
Ecuación 23: Componente de fricción de la superficie. ....	63
Ecuación 24: Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada. ....	63
Ecuación 25: Carga puntual Jet Grouting. ....	64
Ecuación 26: Módulo de elasticidad del Jet Grouting. ....	65
Ecuación 27: Asentamiento Jet Grouting. ....	65

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación abarca el tema de la licuefacción que sucede durante un sismo sobre un suelo arenoso y el uso de técnicas de mejoramiento del suelo para su mitigación. El objetivo principal de este trabajo fue, “Determinar las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos para mitigar los efectos de la licuefacción, utilizando métodos numéricos, en el distrito de Chorrillos”. La zona donde se planteó el uso de estas técnicas fue en la Urbanización la Encantada donde se pretende construir un centro comercial sobre un suelo potencialmente licuable; para ello se diseñó tres técnicas de mejoramiento de suelo: Columna de grava, Inclusiones rígidas y Jet Grouting; mediante métodos numéricos propuestos por autores internacionales. En el diseño de las técnicas, se hizo uso de las fórmulas propuestas en los métodos numéricos, para hallar la Capacidad portante, los Asentamientos y el impacto sobre la Presión de poros. La tesis es de Tipo de investigación Descriptivo, Correlacional y Explicativo. El Nivel de investigación fue Descriptivo. El Diseño de investigación fue Observacional, Transversal y Retrospectivo. Los resultados muestran que las Técnicas de mejoramiento mitigan los efectos de la licuefacción, tanto en el control del Aumento de poros, mejoramiento de la Capacidad portante y reducción de Asentamientos. Por lo tanto, se concluye que las tres Técnicas de mejoramiento, mitigan lo efectos de licuefacción del suelo.

**Palabras Clave:** Técnicas de mejoramiento, Suelos arenosos, Columna de grava, Inclusiones rígidas, Jet Grouting, Licuefacción, Capacidad portante, Asentamiento y Presión de poros.

## **ABSTRACT**

This research work covers the subject of liquefaction that occurs during an earthquake on sandy soil and the use of soil improvement techniques for its mitigation. The main objective of this work was, "Determine the improvement techniques in sandy soils to mitigate the effects of liquefaction, using numerical methods, in the district of Chorrillos". The area where the use of these techniques was proposed was in the La Encantada Urbanization where it is intended to build a shopping center on potentially liquefiable land; For this, three soil improvement techniques were designed: Gravel Column, Rigid Inclusions and Jet Grouting; using numerical methods proposed by international authors. In the design of the techniques, the formulas proposed in the numerical methods were used to find the bearing capacity, the settlements and the impact on the pore pressure. The thesis is of Descriptive, Correlational and Explanatory Research Type. The level of investigation was descriptive. The research design was observational, cross-sectional and retrospective. The results show that the improvement techniques mitigate the effects of liquefaction, both in the control of the increase of pores, improvement of the bearing capacity and reduction of settlements. Therefore, it is concluded that the three improvement techniques mitigate the effects of soil liquefaction.

**Key Words:** Improvement Techniques, Sandy Soils, Gravel Column, Rigid Inclusions, Jet Grouting, Liquefaction, Bearing Capacity, Settlement and Pore Pressure.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día en la mayoría de edificaciones, para salvaguardar las construcciones y a las personas, se hacen los estudios de suelo correspondientes y con ello los tratamientos o reemplazos del suelo. Esta forma de trabajo de estudios y tratamiento del suelo anteriormente en la mayoría de viviendas era muy poco realizada, por ello se tuvo consecuencias catastróficas en las construcciones y la integridad de las personas que viven en ellas, testigo de eso tenemos los daños que se manifestaron durante el terremoto de Pisco (2007), Moquegua (2001), etc. Debido a esto últimamente cada vez más personas tienen el propósito de realizar un correcto estudio de suelos y sus tratamientos si son necesarios.

Esta tesis se realiza en la zona de la Urbanización de la Encantada en el distrito de Chorrillos, donde existe la presencia de arenas saturadas sueltas con limos en su estratigrafía de suelo, esta presencia de este tipo particular de suelo permite una alta probabilidad para que suceda el fenómeno de la licuefacción durante un sismo y por ende un alto peligro para la sociedad. El fenómeno de la licuefacción o licuación; lo que principalmente produce es: baja capacidad portante, asentamientos diferenciales y aumento excesivo de la presión de poros en el suelo. Por ello debido a la importancia que tiene este fenómeno, el principal propósito de esta investigación es mitigar sus efectos.

Este trabajo de investigación aporta, con el diseño de tres técnicas de mejoramiento en un proyecto de Centro Comercial en la Urb. La Encantada sobre un suelo que es arena saturada potencialmente licuable y donde anteriormente estaba pretendido usar solo zapatas sin mejoramiento del suelo. En el diseño de las técnicas, contempla la reducción de la presión de poros, la mejora de la Capacidad portante y la reducción del Asentamiento del suelo licuable.

Para la mitigación de estos efectos negativos que presenta la licuefacción, se tiene el siguiente objetivo general de la investigación: Determinar las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos para mitigar los efectos de la licuefacción; de este objetivo general se detallan los tres objetivos específicos siguientes: Determinar la técnica de Columna de grava para mitigar los efectos de licuefacción del suelo, Determinar la técnica de Inclusiones rígidas para mitigar los efectos de licuefacción del suelo y Determinar la técnica del Jet Grouting para mitigar los efectos de licuefacción del suelo. Estas tres técnicas de mejoramiento, lo que proponen es la mitigación de los efectos de la

licuefacción, los cuales son: Aumento de la presión de poros, baja capacidad portante del suelo y Asentamientos diferenciales en las cimentaciones.

Estas tres técnicas son detalladas teóricamente en el Capítulo II: Marco Teórico, y diseñados mediante métodos numéricos propuestos por autores de la rama de la Geotecnia en Ingeniería Civil en el Capítulo V: Diseño de las Técnicas de Mejoramiento.

Luego del diseño y desarrollo de las técnicas se obtuvo como conclusión general: Las tres técnicas de mejoramiento en general mitigan los efectos de licuefacción del suelo de aumento de presión de poros, baja capacidad portante y asentamientos; lo que permite que el proyecto de la edificación sea seguro durante un futuro sismo.

# CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1. Descripción de la realidad problemática

### 1.1.1. Problema e importancia

El Perú se ubica en una de las zonas de subducción más resaltantes del mundo, llamado “Cinturón de fuego del pacífico”, donde existe un alto peligro sísmico que puede llevar a que las edificaciones colapsen. El Instituto Geológico de Perú, (2014) refiere que alrededor del 80% de los terremotos de mayor magnitud del mundo se manifiestan en esta zona, siendo por ello una referencia para prevenir y construir edificaciones seguras para salvaguardar las vidas humanas.

Los diferentes tipos de suelos en el Perú, poseen un perfil estratigráfico de gran complejidad, por esta razón antes de empezar a construcción una edificación es importante realizar un estudio de mecánica de suelos con la finalidad de conocer las características, propiedades y parámetros del suelo mediante ensayos de laboratorio, con ello se podrá conocer si el suelo a construir es el adecuado para cimentar o requiere de algún mejoramiento.

Concerniente a esta investigación se pretende mejorar los suelos de grano grueso o coloquialmente llamados, suelos arenosos, con un nivel freático elevado; ya que son propensos a fallar por licuefacción en el distrito de Chorrillos. Este distrito se encuentra categorizado en la zona 4 por la zonificación sísmica del Perú de la norma E.030, la zona 4 es considerada de más alta sismicidad y posee un factor de 0.45. Por ello, construir en esta zona implica realizar un mayor análisis para proponer los métodos de estabilización más adecuados según el tipo de edificación a construir, ya que los sismos en este peculiar suelo arenoso, con alto nivel freático, presenta un elevado riesgo de licuefacción.

### 1.1.2. Árbol del problema

El Árbol del problema permite entender las causas y consecuencias del problema del presente trabajo de investigación. Para ello se muestra la siguiente Figura 1.

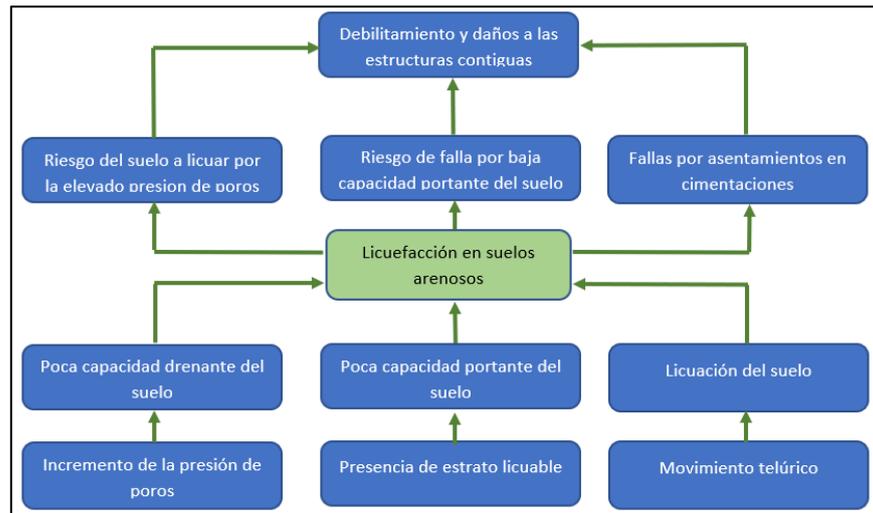


Figura 1. Árbol del problema.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 1, se muestra en la parte inferior, las causas de la Licuefacción en suelos arenosos, y en la parte superior las consecuencias.

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

¿Cómo las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos ayudan a mitigar los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima año 2022?

### 1.2.2. Problemas específicos

- a) ¿Cómo la técnica de columna de grava ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros y los asentamientos?
- b) ¿Cómo la técnica de inclusiones rígidas ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos?
- c) ¿Cómo la técnica del Jet Grouting ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros, baja capacidad portante y los asentamientos?

## 1.3. Objetivos de la investigación

### 1.3.1. Objetivo general

Determinar las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos para mitigar los efectos de la licuefacción, utilizando métodos numéricos, en el distrito de Chorrillos, Lima año 2022.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la técnica de columna de grava para mitigar el aumento de la presión de poros y los asentamientos.

b) Determinar la técnica de inclusiones rígidas para mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.

c) Determinar la técnica del Jet Grouting para mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.

#### 1.4. Delimitación de la investigación

##### 1.4.1. Geográfica

El distrito de Chorrillos es la zona escogida para este trabajo de investigación, ya que presenta una variedad de suelos en sus diferentes capas estratigráficas, y donde uno de ellos es el suelo arenoso licuable.

##### 1.4.2. Temporal

En el ámbito temporal, este trabajo de investigación recopila datos en su mayoría dentro de los últimos 5 años hasta el presente, 2022.

##### 1.4.3. Temática

En cuanto a la temática, está delimitada en los suelos licuables arenosos propios de la zona del distrito de Chorrillos.

##### 1.4.4. Muestral

Las técnicas: Columna de grava, Inclusiones rígidas y el Jet Grouting; son las tres técnicas de las muchas que existen, que se detallan en este trabajo.

#### 1.5. Justificación del estudio

##### 1.5.1. Conveniencia

La presente investigación resulta ser beneficiosa, puesto que con cada una de las técnicas de mejoramiento de suelos se pretende contrarrestar los daños que podría sufrir una edificación a consecuencia de la licuefacción durante un evento sísmico. Así mismo, valorar la importancia de realizar un adecuado estudio de mecánica de suelos con el objetivo de conocer las características, parámetros y propiedades del suelo para posteriormente proponer las posibles alternativas que mejoren sus propiedades, de esta manera se pretende contrarrestar los daños que pueda ocasionar la licuefacción.

##### 1.5.2. Relevancia social

Mediante esta investigación se pretende informar las diferentes técnicas de mejoramiento de suelos, con el deseo que se desarrollen en el país, de manera especial para las personas que viven en el distrito de Chorrillos, ya que hoy en día existe un alto porcentaje de familias que autoconstruyen

sus viviendas, en suelos que son altamente licuables, de esta manera se desea proponer las soluciones más viables que atenúen la licuefacción.

#### 1.5.3. Aplicaciones prácticas

Las técnicas de mejoramientos de los suelos que se brindan en la presente investigación son los métodos más adecuados según el comportamiento del suelo estudiado, para ello, se hizo una recopilación de estudios de suelo con el propósito de conocer e interpretar su comportamiento, y así proporcionar la alternativa técnica más adecuada para el mejoramiento del suelo. Es preciso decir que esta investigación resulta como fundamento para aquellos investigadores que se encuentren en búsqueda de información y requieran medidas de solución para evitar o controlar los daños que pueda ocasionar la licuefacción.

#### 1.5.4. Utilidad metodológica

El estudio es descriptivo y explicativo, puesto que brinda de forma detallada los estudios que se recolectaron para identificar las zonas vulnerables a licuación y sus soluciones mediante las tres técnicas de mejoramiento.

#### 1.5.5. Valor teórico

La investigación brinda un material prometedor en lo vinculado a la identificación de suelos licuables y a las medidas que se toman ante este hecho, puesto que está comprendida por distintas técnicas de mejoramiento de suelos que en la actualidad se toman en cuenta como alternativas de solución.

### 1.6. Importancia del estudio

La presente investigación es de suma importancia para la sociedad, ya que la licuefacción de suelos causa problemas muy graves como deslizamientos, hundimientos, volcaduras, etc. Es por ello, que se busca resaltar la importancia de realizar un adecuado estudio de mecánica de suelos y consecuentemente, conocer si el suelo donde construir es el adecuado o no. A través de esta investigación se pretende salvaguardar las construcciones y vidas humanas que habitan dentro de ellas, todo ello resulta ser la principal importancia de este trabajo de investigación, para ello es necesario saber y entender el comportamiento del suelo, para así dar las soluciones ingenieriles más adecuadas que mitiguen la licuefacción.

#### 1.6.1. Nuevos conocimientos

El presente trabajo presenta soluciones ingenieriles con Técnicas de Mejoramiento del Suelo novedosas dentro del distrito de Chorrillos, y con ello se brinda información sobre que métodos son eficaces, para prevenir el riesgo de licuación en un futuro evento sísmico en la zona.

#### 1.6.2. Aporte

El presente trabajo de investigación aporta, con el diseño de tres técnicas de mejoramiento en un proyecto de Centro Comercial en la Urb. La Encantada sobre un suelo que es arena saturada potencialmente licuable y donde anteriormente estaba pretendido usar solo zapatas sin mejoramiento del suelo; en el diseño de las técnicas, contempla la mejora de la Capacidad portante y la reducción del Asentamiento del suelo licuable.

#### 1.7. Limitaciones del estudio

##### 1.7.1. Metodológicos o prácticos

Debido a la coyuntura nacional sobre la Pandemia durante estos últimos 3 años, el presente trabajo es de carácter descriptivo y documental en cuanto a la toma de datos, debido a que es de difícil acceso llegar a realizar ensayos de laboratorio, y solo se fundamenta en ensayos ya realizados por el CISMID en la zona.

##### 1.7.2. Medidas para la recolección de los datos

La recolección de datos es mediante la Web, donde se encuentra una inmensa variedad de información sobre las Técnicas de mejoramiento de suelos licuables. En la Web se encuentran artículos, tesis, revistas de investigación, videos, etc; que son de carácter científico y sirven de sustento para este trabajo.

##### 1.7.3. Obstáculos de la investigación

Difícil acceso a información específica de la zona, debido a que solo se cuenta con información de la web.

No lograr hacer estudios y ensayos específicos de los diferentes suelos licuables a estudiar en laboratorio, solo basarse en estudios previos de la zona.

#### 1.8. Alcance

El presente trabajo de investigación tiene como fin servir a los lectores como estudio para trabajos, artículos y tesis; el cual ayude a brindar un claro panorama de lo que es un problema casi común de la licuación en el suelo de Chorrillos.

Específicamente este trabajo identifica la zona vulnerable a la licuación del suelo en la Urb. La Encantada de Chorrillos, detalla estudios geológicos y geotécnicos de la zona para que se desarrolle las soluciones con tres técnicas de mejoramiento que ayuden a mejorar y mitigar el suelo ante una posible licuación en un futuro evento sísmico.

#### 1.9. Viabilidad del estudio

El tipo de suelo en la zona de La Encantada es potencialmente licuable, debido a la presencia de arenas saturadas, y con ello es viable el diseño de las tres técnicas de mejoramiento que se proponen en este trabajo de investigación. Existe data sobre la estratigrafía del suelo de esta zona en los estudios realizados por el CISMID en el año 2010 con la que se basa principalmente este trabajo. Existe metodologías internacionales con las que este trabajo se apoyó para la realización de las tres técnicas de mejoramiento.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Marco histórico**

El fenómeno de licuefacción originado como consecuencia de la actividad sísmica, ha estado presente en el Perú en reiteradas ocasiones, su presencia generalmente se observa en suelos compuestos por arenas limosas de distinto tamaño y por la presencia de un nivel freático alto.

Este fenómeno de la licuación afecta principalmente a las edificaciones que se construyen sobre suelos que no han tenido un tratamiento correcto, esto produce principalmente una mala planificación en el proceso constructivo de las viviendas o edificaciones, donde no se hacen estudios de suelo y por lo tanto no hay tratamientos especiales para estos suelos licuables.

La información de los acontecimientos más resaltantes ocurridos en el Perú, se encuentra detallado en un mapa de licuefacción de suelos que fue elaborado por el Dr. Ing. Jorge Alva Hurtado en la Figura 2, en este mapa se aprecia a la zona costera como la de mayor ocurrencia a sufrir licuefacción, siendo la zona donde se ha producido los sismos de mayor intensidad a lo largo del tiempo.

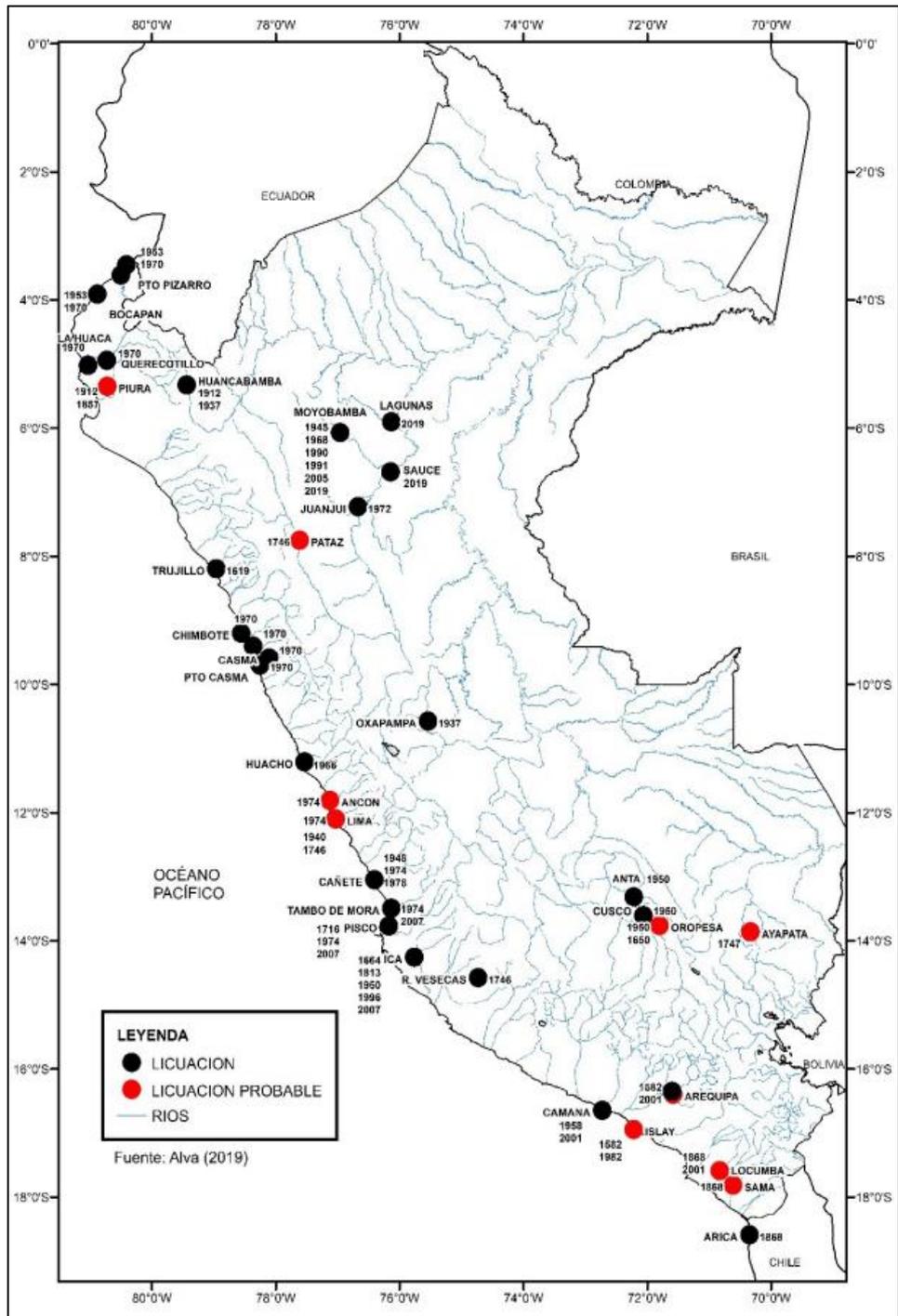


Figura 2. Mapa de recolección de zonas de licuación.

Fuente: Alva, J. & Ortiz, C. (2019).

A continuación, se detallarán los procesos de licuefacción más resaltantes de la Figura 2 ocurridos en el Perú.

Chimbote, 1970: El departamento de Áncash fue afectado por la ocurrencia de un evento sísmico de magnitud 7,7 Mw, debido a este sismo elevado se produjo la licuación de los suelos en la ciudad de Casma y cerca de la costa de la ciudad de

Chimbote, hubo desplazamiento lateral del suelo. Cluff (1971) mencionó la ocurrencia de fallas en suelos saturados y sueltos, y con ello la manifestación de pequeños volcanes de arena y erupciones de agua típicos de la licuefacción.

Moyobamba, 1990 y 1991: El valle del Alto Mayo fue afectado por la ocurrencia de dos sismos con magnitudes entre 6 Mw y 7 Mw, provocando la licuación de suelos en varias zonas con suelos de arena suelta con elevado nivel freático; es decir, suelos licuables por naturaleza. Asimismo, se manifestó la ocurrencia de inestabilidad de suelos en los taludes, asentamientos diferenciales, y deslizamientos dentro de la zona del epicentro. Los mayores procesos de licuación de suelos ocurrieron en los sectores de Tahuishco, Shango, Río Negro y La Conquista, todos ubicados en las zonas aledañas de Moyobamba.

Pisco, 2007, Durante la ocurrencia del sismo de Pisco, las localidades de Chinchá y Tambo de Mora soportaron intensidades elevadas y la zona más comprometida por la licuefacción de suelos se encuentra ubicado entre el distrito de Villa el Salvador y la ciudad de Paracas (Ica). Se manifestaron gran variedad de fallas de terreno por licuación, así también como desplazamientos laterales masivos de terraplenes a lo largo de 3 km de distancia, un deslizamiento de talud en Jahuay de 400 metros aproximadamente, construcciones con asentamientos menores a 1 metro, destrucción de postes de electricidad, ruptura de tuberías de agua y alcantarillado, daños en puertos; además, de la formación de conos de arena y eyección de arena húmeda. Estos procesos se realizaron en suelos conformados por rellenos artificiales, depósitos marinos, eólicos y aluviales compuestos por arena y arena limosa de forma y tamaño de grano variable.

En la siguiente Figura 3 se muestra algunas imágenes de los resultados de la licuefacción en el Perú.



*Figura 3.* Ejemplos de licuefacción en el Perú.

Fuente: Tavera, H. (2014).

## 2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

### 2.2.1. Investigaciones nacionales e internacionales

Rios, A. J. & Rojas J. (2020) en su tesis explica sobre el efecto de la implementación de inclusiones dentro de un suelo potencialmente licuable; específicamente de la Columna de Grava y de la Columna de Módulo Controlado, ambas técnicas tuvieron una plataforma de transferencia de carga. Se obtuvo valores y factores de seguridad favorables ante la licuación. Los efectos que tuvo la Columna de Grava estuvieron dentro de los límites aceptables que determina la norma peruana; tuvo un factor de seguridad de licuación mayor a 1.0, tuvo asentamientos no mayores a 1.87 pulg. y 10% de probabilidad de licuación. Por el lado de la Columna de Módulo Controlado, también se obtuvieron resultados admisibles; como por ejemplo en esfuerzo al corte de 1098.00 kN/m<sup>2</sup> que es mayor a la inicial que era de 301.90 kN/m<sup>2</sup>.

Espinoza, C. E. & Torres, C. M. (2019) en su tesis explica; sobre la implementación de dos técnicas: Compactación Dinámica e Inclusiones Rígidas; para mejorar el terreno con baja capacidad portante y poca resistencia al corte. Por parte de la aplicación de la Compactación Dinámica, se mejoró la capacidad portante de 0.8 kg/cm<sup>2</sup> hasta 2.50

kg/cm<sup>2</sup>, y en los asentamientos se mejoró de 6.8 cm hasta 0.6 cm, evidenciando estar dentro de los parámetros de la norma peruana. Por el lado de las Inclusiones Rígidas, se colocó 302 inclusiones separadas unas entre sí por 3.5 m. y valores de capacidad portante de 6.15 kg/cm<sup>2</sup>, los asentamientos obtenidos fueron de 1.06 cm.

Suárez, S. M. & Uribe, A. P. (2020) en su tesis muestra, sobre dos técnicas de mejoramiento de suelo y su uso en dos determinadas zonas de la Base Naval del Callao; primero para la zona sureste de la base se demostró que la Columna de Grava es la más factible; mientras para la zona noreste la Compactación Dinámica fue la mejor tanto técnica como económica, ya que la columna de grava en esta zona resultaba más cara debido a la mayor área de expansión.

Nieto, J. J. & Tolentino, M. A. (2021) en su tesis, menciona sobre la implementación de Inclusiones Rígidas sobre suelos blandos, y la mejora que esto conlleva; mediante un análisis PLAXIS de un modelo Axisimétrico, se comprueba la rigidez que tienen estas inclusiones respecto a los asentamientos que comprende este suelo blando.

Medina, P. M. (2018) en su tesis, demuestra que el uso de Inclusiones Rígidas tiene mejor comportamiento que una cimentación superficial reforzada con Micropilotes; las inclusiones rígidas fueron en total 340, con diámetros de 40 cm y con una resistencia del concreto simple a los 28 días de  $F'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ .

Núñez, F. C. (2017) en su tesis, da a conocer las características físicas y mecánicas de los suelos de granos finos, luego considera que cuando el suelo es comprensible y la potencia de los estratos del material fino impide su reemplazo, se debe recurrir a lo denominado como “métodos de mejoramientos de suelos”; se plantea la vibro-sustitución como técnica de solución, resultando efectivo en suelos de granos finos, con ello el suelo reduce su compresibilidad, le brinda mayor rigidez y resistencia al corte del terreno; posteriormente, se utiliza métodos simplificados como modelos numéricos de elementos finitos, para cuantificar la influencia como el diámetro, rigidez, propiedades de la grava, etc.; finalmente, se hace una comparación entre los asentamientos del suelo mejorado y sin mejorar.

Provincial, O. (2020) en su tesis, explica el mejoramiento del suelo con inclusiones rígidas en suelos blandos, el primer lugar hace un análisis de este suelo mejorado con inclusiones rígidas y los mecanismos de transferencia que se obtienen al aplicarle una carga, tras analizar el probable funcionamiento del terreno mejorado, compara los resultados mediante el método analítico propuesto por Combarieu y el método de elementos finitos con Plaxis 2D; finalmente se realiza un estudio de alternativas de mejoramiento con inclusiones flotantes, posteriormente, una composición con inclusiones empotradas en el estrato idóneo.

#### 2.2.2. Artículos relacionados con el tema

Cheng et al. (2019) este artículo explica sobre: Los mecanismos y técnicas de desaturación mediante burbujas estables e insolubles, donde sus principales ventajas de este método es la económica y la trabajabilidad; pero una de sus grandes desventajas viene a ser que este método está en su etapa de experimentación teórica-experimental, mas no práctica en campo.

García et al. (2017). En el artículo se da a conocer un análisis de licuefacción mediante ensayos de laboratorio, así mismo se realiza un análisis del comportamiento del suelo arenoso frente a tensiones cortantes para cargas monotónica y cíclicas en condiciones no drenadas, luego se realiza un análisis con el modelo constitutivo UBC3D y la aplicación “Soil test “de elementos finitos con Plaxis 2D conociendo ello se plantea mejorar el terreno con columnas de grava con la finalidad de mitigar los daños que este puede ocasionar.

Jamal, H., & Ivo, H. (2020) en el artículo se explica: Tanto la compactación del suelo circundante a las columnas, y las mismas columnas de grava contribuyen significativamente en la prevención de la licuefacción. Por otro lado, este mecanismo de la columna de grava previene por completo la licuefacción en terremotos pequeños, mientras que en los terremotos de mayor magnitud la licuefacción solo es retrasado.

Karahan G. N., & Sivrikaya O. (2018) en el artículo se explica: Las cantidades correctas de lechada, dosificación del cemento, agua y presión de aire; para componer una adecuada mezcla en el desarrollo de la técnica del Jet Grouting y así evitar asentamientos y la licuefacción.

Popa C.C., & Muşat V. (2018) en el artículo se demuestra: Las inclusiones rígidas reducen los asentamientos de las cimentaciones, y por otro lado también influyen en las tensiones de la base de la cimentación, esta influencia depende mucho de las cargas externas que recibe las cimentaciones. Mientras la base de la cimentación tenga un comportamiento flexible, las inclusiones rígidas reducen los momentos positivos, independientemente de las cargas externas a las que es sometida.

## 2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

### 2.3.1. Licuación en suelos arenosos

Los suelos arenosos, en estado suelto, tienden a densificarse cuando son sometidas a cargas cíclicas. Para Meneses, S. (2019) las partículas del suelo comienzan a colapsar y a reducir su volumen, si este es incapaz de drenar el agua o el drenaje es muy lento, las presiones ejercidas por el agua en los poros se incrementan con la acumulación del colapso de cada vez más partículas del suelo hasta anularse con el esfuerzo efectivo sobre él, lo cual conlleva a que las partículas pierdan contacto entre ellas y se genere la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Durante este proceso el suelo se comporta y fluye como un líquido viscoso, que es el que ahora soporta la carga vertical que inicialmente era soportada por el suelo rígido, de esta manera las estructuras apoyadas sobre suelos que se están licuando fallan por la insuficiente capacidad portante que presentan durante dicho proceso. Luego de terminado el sismo, las partículas del suelo afectado se asientan y compactan, para luego recuperar su capacidad portante que se verá reducida en comparación a la capacidad inicial del suelo antes de sufrir licuación.

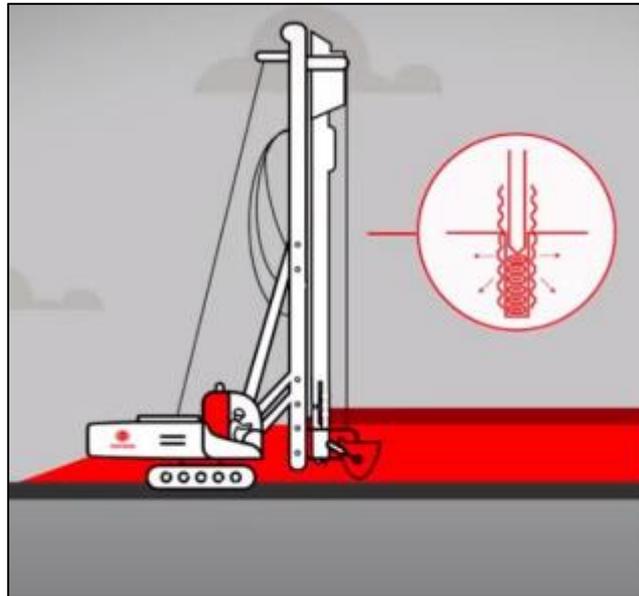
### 2.3.2. Columna de grava

Esta técnica también llamada Vibro sustitución, es una alternativa para lograr construir una cimentación superficial donde se recomiende una cimentación profunda.

Dentro de su proceso constructivo, se tiene:

Primero, se remueve el material inestable del suelo para que se penetre con el vibrador hasta que alcance el estrato estable, donde supuestamente debió llegar el pilote (en caso fuese una cimentación profunda). Este vibrador se inca en el terreno y a su vez densifica las paredes del suelo

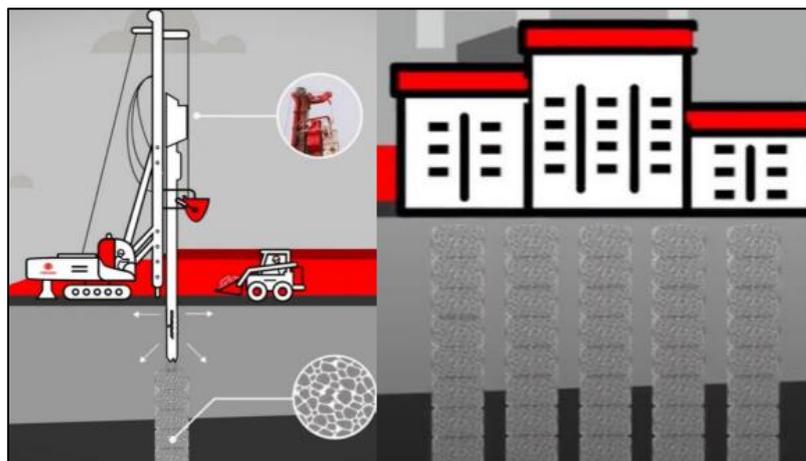
inestable hasta llegar al estrato seguro. La columna que se va formando tiene de diámetro entre los 40 centímetros hasta 1.2 metros. El proceso de colocación y compactación se presenta en la Figura 4 y Figura 5.



*Figura 4.* Máquina vibratoria para la técnica de Vibro sustitución.

Fuente: Menard España (2018).

Luego se introduce la grava por un tubo que se ubica dentro de la máquina vibratoria y desciende hasta el estrato seguro. Este ciclo de llenado y descenso de la grava se repite varias veces, junto con la propia compactación que en cada ciclo lo realiza el propio vibrador.



*Figura 5.* Colocación de las columnas de grava.

Fuente: Menard España (2018).

Finalmente se obtiene una serie de columnas de grava compactada, rodeada de un subsuelo mejorado, apto para la construcción de una cimentación superficial.

Jamal, H., & Ivo, H. (2020) mencionan que, en caso de un terremoto de magnitud baja, la licuefacción en suelo arenoso se previene en su totalidad, y si el terremoto es de gran magnitud, la licuefacción solo se retrasa, mas no se previene.

### 2.3.3. Inclusiones rígidas

Este método se apoya mediante la penetración de un taladro sin vibración que desciende hasta el estrato seguro. La profundidad máxima de estos taladros es de 6 metros y los diámetros varían entre 250 y 450 milímetros. Luego de que el taladro haya penetrado el terreno, se coloca una lechada o mortero a través de un orificio en el taladro, y que al momento de que el taladro asciende, va dejando una columna de material cementante, tal como se observa en la Figura 6.

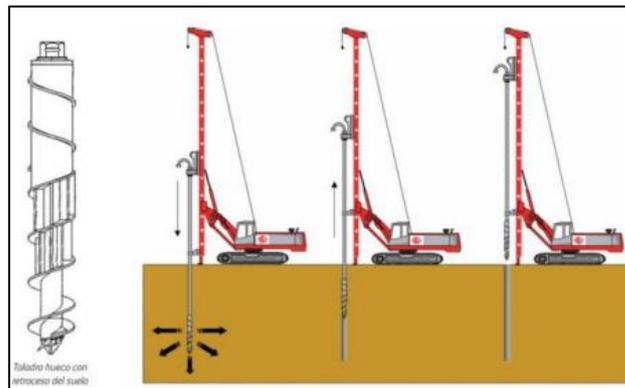


Figura 6. Proceso constructivo de Inclusiones rígidas.

Fuente: CAPECO.

Las características del mortero son las siguientes:

- Slump superior a 160mm e inferior a 220mm.
- Cemento Tipo V (resistente a sulfatos).
- Agregado:  $D_{\text{máx}}$  10mm.
- $F'c=150\text{kg/cm}^2$  a los 28 días.

### 2.3.4. Jet Grouting

Keller Group (2022), menciona:

Es una inyección radial de lechada, a muy alta velocidad, para lograr erosionar el terreno, reemplazando parcialmente el material erosionado y mezclándolo con un agente cementante dando origen a un producto denominado “soilcrete”, requiere de una tubería de perforación equipada en su extremo, monitor con toberas de

inyección y bombas de elevada presión que deben suministrar constantemente grandes cantidades de lechada

Se utiliza en recalces de estructuras cimentadas sobre terrenos licuables, mediante la ejecución de columnas de jet en todo el perímetro de la cimentación, transmitiendo la carga de la estructura a estratos mejor calificados (Keller Group, 2022).

Esta técnica perfecciona las siguientes propiedades: Confina el área circundante de manera representativa, mejora propiedades geo- mecánicas y físicas. El proceso de rocío, degradación con el suelo y compactación de la lechada se observa en la siguiente Figura 7.

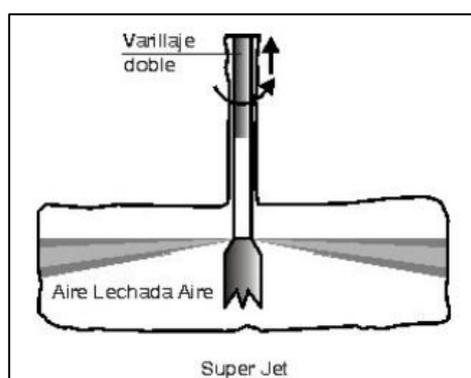


Figura 7. Sistema Super Jet Grouting.

Fuente: Henríquez (2007).

Sistema Super Jet Grouting: Este sistema utiliza la base de un sistema de doble fluido (aire+lechada), pero con un monitor altamente sofisticado, especialmente diseñado para gobernar y focalizar de una manera precisa la energía de la materia inyectada. La lechada es empleada para erosionar y a su vez mezclarse con el suelo para formar el soilcrete. El aire recubre el jet de lechada para elevar la eficacia de la erosión. Valiéndose de una baja velocidad de rotación y ascenso, se alcanzan grandes diámetros de columnas de suelo tratado.

#### 2.3.5. Capacidad drenante

Rosales, C. A. (2021) menciona que dentro de la Capacidad drenante: la capacidad con la que el agua pueda fluir por un suelo es consecuencia directa de las características propias del material granular entre las que se contemplan; el tamaño de las partículas, la relación de vacíos, el grado de saturación, la composición y para el fluido se contempla la densidad y la viscosidad.

### 2.3.6. Presión de poros

Pradenas et al. (2017) menciona, es la presión ejercida por un fluido, generalmente agua, en los espacios vacíos del grano del suelo, está en función del tipo de fluido y de la carga soportada por el suelo.

Según el artículo de Pradenas et al. (2017) la presión de poros natural durante un evento sísmico o grandes cantidades de cargas estáticas, aumenta, lo que resulta en una incapacidad de disipación de este exceso de presión; esto conlleva a que la disipación se ejecute hacia la superficie llevando partículas de suelo, esto a su vez produce asentamientos por el cambio de volumen en el proceso.

### 2.3.7. Capacidad portante

La capacidad portante es el factor principal del suelo, esta depende de las capas que la comprende y dentro de estas la densidad, humedad y relación de vacíos.

Villalaz, C. (2004) la capacidad portante no depende solo del terreno, sino también de la misma cimentación, el tipo de estructura y el coeficiente de seguridad el cual es único para cada tipo de edificación.

Villalaz, C. (2004) menciona tres tipos de falla por la capacidad portante del suelo:

Falla por *corte general*: Sucede generalmente en arenas densas y arcillas rígidas. Se ejecuta por el deslizamiento de las estructuras en el borde de la cimentación, y finaliza en una parábola en la superficie del terreno, como se observa en la Figura 8.

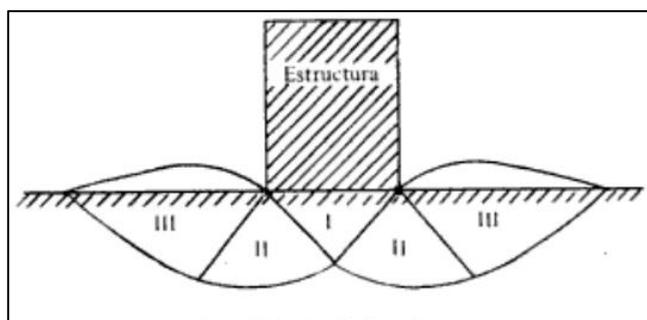
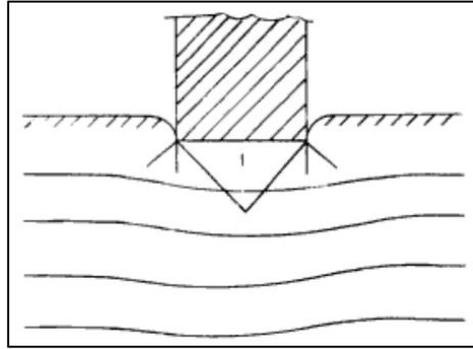


Figura 8. Falla por corte general.

Fuente: Villalaz, C. (2004).

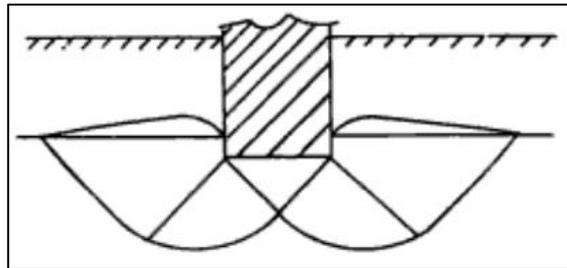
Falla por *punzonamiento*: Se realiza por un movimiento vertical mientras el suelo debajo es contraído. La estructura de la Figura 9 queda equilibrada en forma vertical y horizontal a la vez.



*Figura 9.* Falla por punzonamiento.

Fuente: Villalaz, C. (2004).

Falla por *corte local*: Se ejecuta en arenas sueltas y en arcillas. Se forma tanto la falla por corte general y punzonamiento; pero con la diferencia de mayor hundimiento del suelo alrededor de la estructura y mayor desplazamiento vertical, tal como se observa en la Figura 10.



*Figura 10.* Falla por corte local.

Fuente: Villalaz, C. (2004).

#### 2.3.8. Asentamientos en cimentaciones

Para Largo, C. M. (2014) los asentamientos en cimentaciones ocurren por los diferentes niveles de carga en los puntos de apoyo cimiento-terreno; aquellos asentamientos generalmente son diferentes que cada punto de apoyo y transfieren a la edificación repercusiones al mismo momento de la construcción o a futuro en la calidad de la estructura. Si los cimientos se apoyan sobre suelos compactos o duros, los asentamientos pueden ser muy pequeños; sin embargo, si se trata de suelos blandos, el asentamiento puede ser de algunos o varios centímetros. Gran parte de los asentamientos diferenciales pueden producirse durante la construcción, en otros casos,

los asentamientos se producen muy lentamente y se tienen los efectos durante varios años, mucho después de terminada la obra.

### 2.3.9. Asentamiento por sismo

De acuerdo a la teoría formulada por Richards et al. (1993) el asentamiento diferencial conectado con la capacidad de carga en un evento sísmico, es manifestado en el momento que se logra un valor crítico en las fuerzas que actúan bajo la cimentación ( $K_v=0$  para suelos granulares). Por ende, los cálculos para la capacidad de carga y el asentamiento se realizan optando que el valor  $K_v$  es neutro, es decir 0; esto se hace con el fin de que el análisis sea en la manera más desfavorable.

En la siguiente Ecuación 1 se muestra el asentamiento de una cimentación por sismo propuesta por Das, B. (2001).

Ecuación 1: *Asentamiento de cimentación debido a sismo.*

$$S_{Eq} = 0.174 \frac{V^2}{Ag} \left| \frac{K_h}{A} \right|^{-4} \tan(\alpha_{AE}) \quad (1)$$

Dónde:

$S_{Eq}$ : Asentamiento de una cimentación debido al sismo

V: Velocidad máxima del sismo

A: coeficiente de aceleración para el sismo de diseño

g: aceleración de la gravedad

$\tan(\alpha_{AE})$ : variación de  $K_h$  y ángulo de fricción

A continuación, se muestra la Figura 11 donde se muestra los ábacos necesarios para los cálculos de los valores requeridos con el motivo de desarrollar las fórmulas propuestas por Richards et al. (1993).

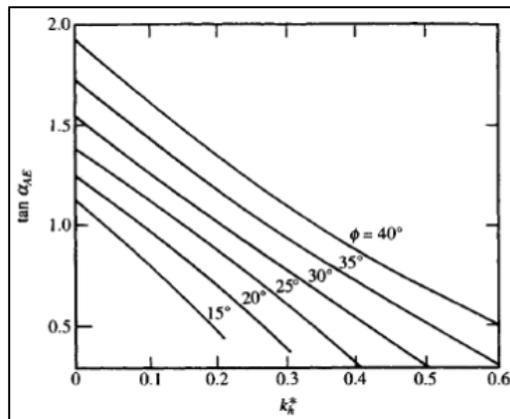


Figura 11. Variación de  $\tan \alpha_{AE}$  con  $K_h$  y ángulo de fricción del suelo  $\phi$ .

Fuente: Richards et al. (1993).

### 2.3.10. Capacidad de carga por sismo.

En Richards et al. (1993) desarrolló una conjetura en la que se muestran las consecuencias de un evento sísmico en una fundación superficial. Este autor no fue el primero en colocar los efectos dinámicos provocados por sismos en investigaciones, pero si lo fue en desarrollar una teoría ejemplar para los efectos dinámicos y estáticos como fuerzas actuantes en las cimentaciones superficiales. Cabe recalcar que estos planteamientos son aún teorías y no han podido ser comprobados con datos reales en campo. El planteamiento recomienda que la manifestación del sismo incrementa las fuerzas demandantes de forma cambiante. Este efecto ocasiona una fuerza variable por debajo estructura, la cual se puede observar en la Figura 12.

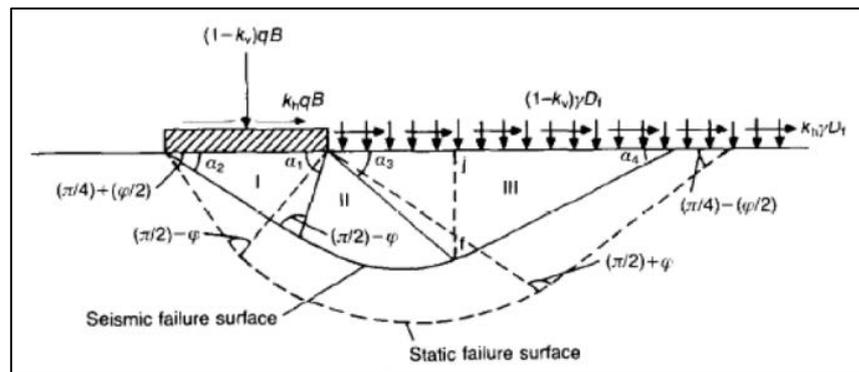


Figura 12. Superficie de falla estática y dinámica.

Fuente: Das, B. (2001).

Este método debido a las condiciones de falla muy parecidas a las de la licuefacción del suelo, sus resultados suelen ser confundidos, por lo que hay que tenerlo presente. Esta metodología es recomendable porque se evalúa de forma precisa el diseño geotécnico, y con ello se manifestaría en diseños de muy buena calidad y que transmitiría seguridad; por otro lado, también se pueden evitar indirectamente futuras fallas provocadas por la licuefacción.

### 2.3.11. Método de Priebe

De todas las metodologías existentes, el método de Priebe, H. J. (1995) es catalogada como una de las más antiguas metodologías para el diseño y cálculo de reducción de asientos. Esta metodología lo pretende es hallar los parámetros del suelo equivalente mejorado partiendo inicialmente de las características del terreno original deducidas del informe geotécnico y

las columnas de grava. Se tiene como finalidad que este método logra una estimación rápida de la reducción de asentamientos que pueden lograr las columnas de grava, solamente teniendo en cuenta el ángulo de rozamiento del material de aporte. El cálculo del asiento con columnas se realiza de un modo indirecto, es decir a través del asiento sin columnas y un factor de mejora, que es el inverso del factor de reducción de asientos. De esta manera, esta metodología proporciona únicamente el factor de mejora. En la siguiente Figura 13 se muestra el ábaco para obtener en valor del Factor de mejora.

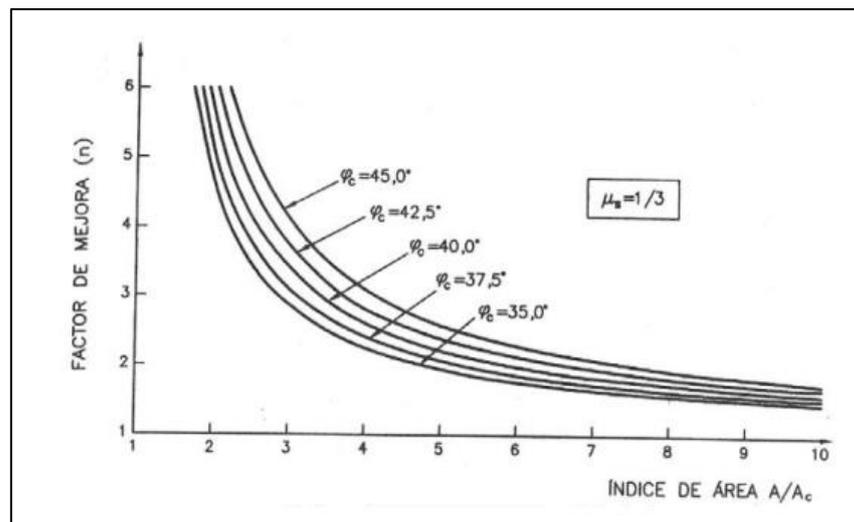


Figura 13. Ábaco para el diseño de columnas de grava.

Fuente: Priebe, H. J. (1995).

Como hipótesis de partida para el diseño, Priebe considera que:

- La deformación vertical del suelo es la correspondiente a condiciones edométrías, es decir con confinamiento lateral.
- La columna es rígida – plástica, es decir, se deforma solo si la tensión horizontal, radial, en su pared es menor al empuje activo correspondiente a la carga vertical al que está afectada.
- En este estado límite, la columna se deforma sin modificarse en cuanto a su volumen.
- El coeficiente de empuje en estado de reposo del terreno vale uno.
- Si la presión radial que actúa en la pared suelo-columna no corresponde con este valor, el suelo se deforma elásticamente.

Cabe precisar que el método de Priebe es el más usado por las empresas constructoras que aplican y diseñan métodos de mejoras con columnas de gravas, tanto en el Perú, como en el mundo, teniendo pequeñas variaciones, pero siendo básicamente la misma ya que las otras metodologías parten de este método y cumplen con la misma finalidad.

#### 2.3.12. Metodología Asiri

La metodología de Asiri National Project (2011) realizada en Francia, está formada por un conjunto de recomendaciones para la mejora del suelo mediante la inserción de Inclusiones rígidas. El esfuerzo colectivo para la realización de esta metodología se ha basado en la aportación de 39 empresas y organizaciones asociadas, cuyos estudios de investigación se realizaron entre 2005 y 2011 con un presupuesto de alrededor de 2.7 millones de euros.

Dentro de las recomendaciones se realiza un conjunto de experimentos físicos y modelos numéricos como pasos para comprender y diseñar las inclusiones rígidas en el ámbito de mejoramiento de suelos.

Esta metodología plantea la incorporación de una capa de transferencia para el mejor funcionamiento y repartición de cargas en del diseño de las Inclusiones rígidas.

#### 2.3.13. Metodología Karahan & Sivrikaya

La metodología de Karahan, G. N., & Sivrikaya, O. (2018) está basada en modelos numéricos, específicamente en ecuaciones para el cálculo de la Capacidad portante y el Asentamiento reducido de la columna del Jet Grouting. Esta metodología se basa en la formación de ecuaciones mediante comparaciones de varios estudios como Coduto, D. P. (2001) y Vesic, A. (1977) los cuales obtuvieron sus hallazgos experimentales y resultados en soluciones empíricas por el uso de columnas formadas de mezcla entre lechada y erosión del suelo (Jet Grouting). Al igual que la metodología de Asiri, la metodología de Karahan & Sivrikaya propone una capa de transferencia, cuya función es la misma de las inclusiones rígidas, la cual es un mejor reparto de las cargas actuantes sobre las columnas de Jet Grouting.

#### 2.3.14. Características sísmicas de la zona

El Perú se encuentra ubicado en una de las zonas sísmicas más activas del planeta, conocida como el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde las placas tectónicas debajo del océano pacífico interactúan constantemente friccionándose entre ellas, acumulando tensión y energía, lo que hace que se generen grandes terremotos en los países que lo integran.

Como se mencionó al principio, la costa del país se ubica entre las placas de Nazca y la placa Sudamericana, la cual es llamada como “zona de subducción”, esta es la zona donde ocurren constantes fenómenos sísmicos y volcánicos, por lo que constantemente deben evaluarse nuevos métodos de análisis para la construcción de cualquier estructura. Esto se ve reflejado en los constantes cambios que tiene la Norma E 0.30 de Diseño Sismo Resistente en el que se va mejorando sus parámetros mínimos de diseño, debido a los numerosos estudios realizados muchos indican que la zona costera del país se encuentra bajo un riesgo “Muy Alto” de que ocurran grandes terremotos. Para las características de la zona del distrito en estudio, es importante reconocer que es considerado de las peores zonas para construir viviendas.

En el siguiente mapa en la Figura 14 se mostrará 5 zonas, en las cuales se detallará los periodos de vibración máximas que pueden mostrarse durante un sismo.

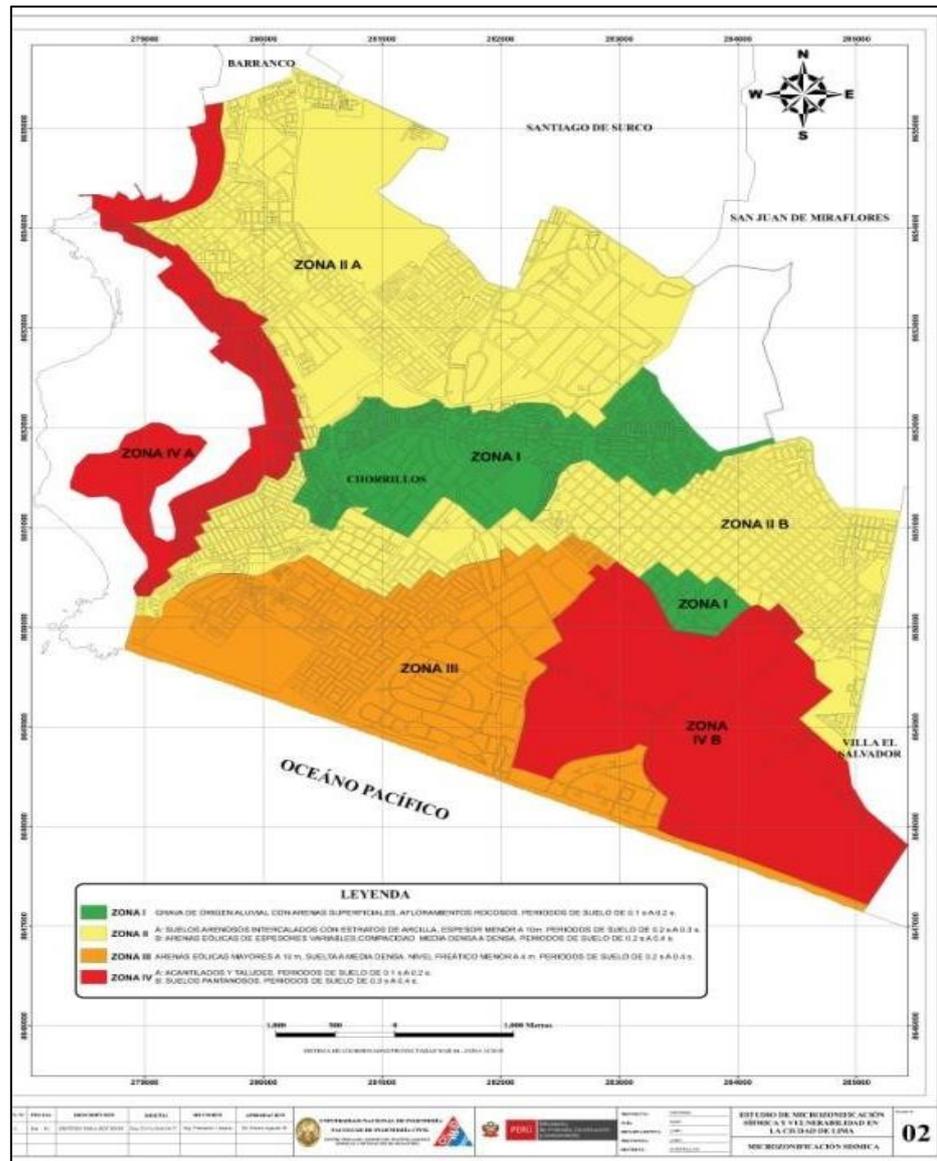


Figura 14. Mapa de microzonificación sísmica de Chorrillos.

Fuente: CISMID (2011).

De la Figura 14 se muestra, la zona I tiene periodos de 0.1 a 0.2s, la zona II A muestra periodos de vibración de 0.2 a 0.3s, la zona II B muestra periodos de vibración de 0.2 a 0.4s, en la zona III se muestra periodos de vibración entre 0.2 a 0.4s, en la zona IV A se muestra periodos de vibración de entre 0.1 a 0.2s, y por último en la zona IV B se muestra periodos de vibración de entre 0.3 a 0.4s.

### 2.3.15. Características geológicas de la zona

La zona del distrito de Chorrillos se encuentra dentro del campo de influencia del cono de deyección cuaternario del río Rímac.

Dentro del informe realizado por el CISMID (2010) se explica que el cono de deyección del río Rímac está formado de material aluvial, con presencia de grano grueso y fino.

También se menciona que la zona es atravesada por diversas fallas de magnitud regional, la más importante es la que se conoce como falla de La Chira aproximadamente (N-NO).

El Estudio de Microzonificación sísmica y vulnerabilidad del distrito de Chorrillos (2011), muestra 5 zonas y sus características geológicas correspondientes

En la siguiente Figura 15 se observa la distribución del tipo de suelo en las 5 zonas de Chorrillos.

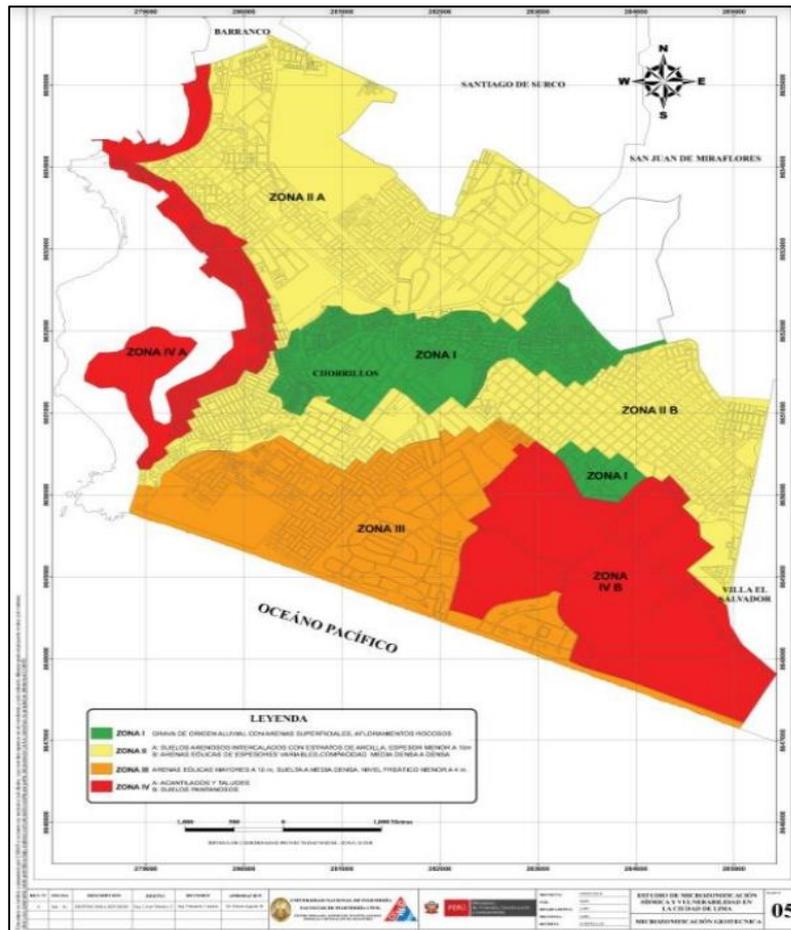


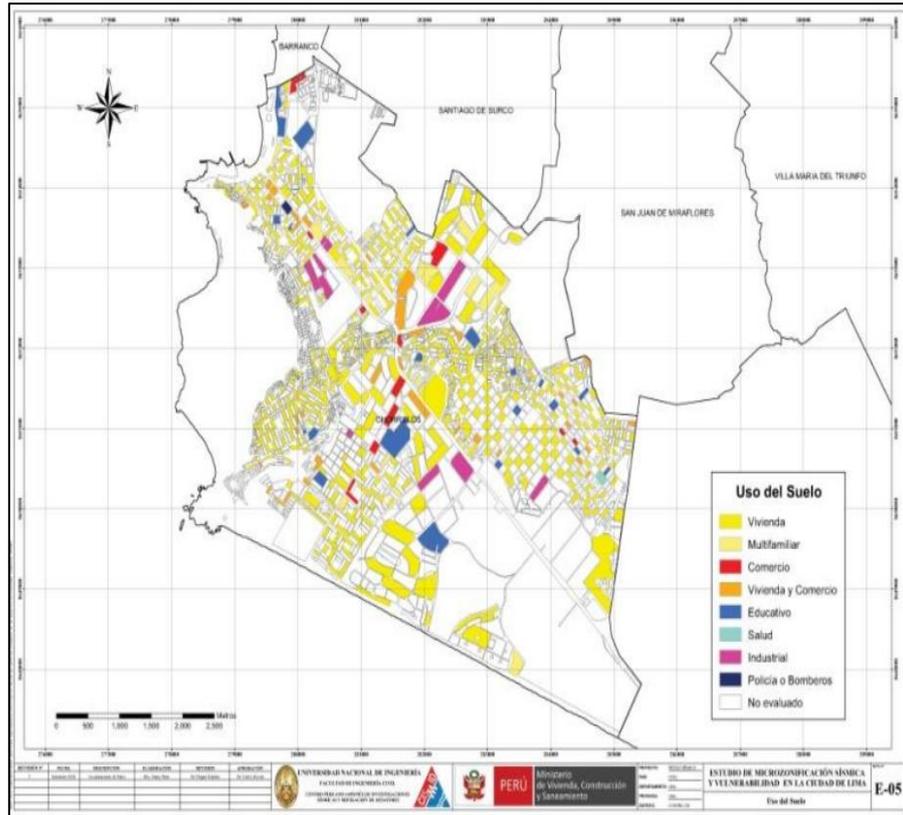
Figura 15. Mapa de microzonificación geotécnica de Chorrillos  
Fuente: CISMID (2011).

De la Figura 15, la zona I muestra grava de origen aluvial con arenas superficiales y afloramientos rocosos, en la zona II A muestra suelos arenosos intercalados con estratos de arcilla, en la zona II B, muestra arenas eólicas de espesores variables y compactación media densa a densas, en la zona III se detalla arenas eólicas menores 10 m, suelta a media densa con nivel freático menor a 4 m, en la zona IV A se muestra acantilados y taludes, mientras que en la zona IV B son suelos pantanosos.

#### 2.3.16. Riesgo sísmico

Para Santibáñez (2006) se entiende por riesgo sísmico a la formulación estadística, que tiene por objeto la estimación de las características máximas que puede tener un sismo, en un determinado lugar y durante un período de tiempo determinado.

La licuación afecta principalmente a los suelos arenosos, y en la zonificación del uso de suelo en el distrito de Chorrillos, existe un alto porcentaje de autoconstrucción de viviendas y por ello existe el riesgo de la presencia de licuación en las viviendas mal construidas en suelos arenosos. En la Figura 16 se muestra los Usos que tiene el suelo de Chorrillos.



*Figura 16.* Mapa de Uso de suelo de Chorrillos

Fuente: CISMID (2011).

En la Figura 16 se muestra la predominancia de uso de suelo principalmente por las viviendas de color amarillo en el mapa de Chorrillos.

### 2.3.17. Tipos de cimentaciones superficiales

Zapatillas aisladas: Su uso es más difundido en las construcciones de viviendas, debido a su costo económico y su facilidad en la ejecución. La ejecución está respaldada cuando no haya distorsiones angulares bruscos en el suelo. Es decir, donde el suelo sea duro o se utilice técnicas de mejoramiento de suelo. Las distorsiones angulares entre zapatas se muestran en la Figura 17, mientras que los límites que perciben las estructuras se observan en la Figura 18.

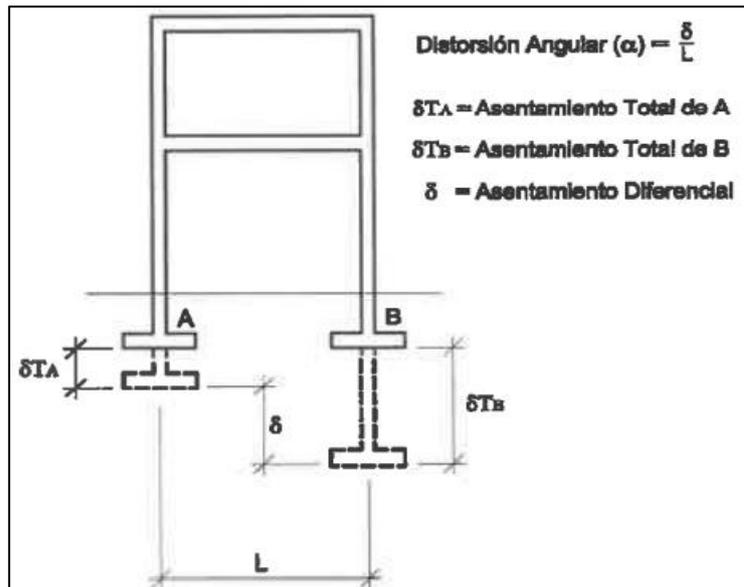


Figura 17. Asentamiento diferencial

Fuente: Norma Técnica E.050. (2018).

TABLA 8 DISTORSIÓN ANGULAR = $\alpha$	
$\alpha = \delta/L$	DESCRIPCIÓN
1/150	Límite en el que se debe esperar daño estructural en edificios convencionales.
1/250	Límite en que la pérdida de verticalidad de edificios altos y rígidos puede ser visible.
1/300	Límite en que se debe esperar dificultades con puentes grúas.
1/300	Límite en que se debe esperar las primeras grietas en paredes.
1/500	Límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas.
1/500	Límite para cimentaciones rígidas circulares o para anillos de cimentación de estructuras rígidas, altas y esbeltas.
1/650	Límite para edificios rígidos de concreto cimentados sobre un solado con espesor aproximado de 1,20 m.
1/750	Límite donde se esperan dificultades en maquinaria sensible a asentamientos.

Figura 18. Límites de Distorsión angular

Fuente: Norma Técnica E.050 (2018).

La forma de estas zapatas (rectangulares, cuadradas), son directamente proporcional a las cargas que estas reciben por parte de la estructura. E la siguiente Figura 19 se muestra la forma de una zapata aislada convencional.

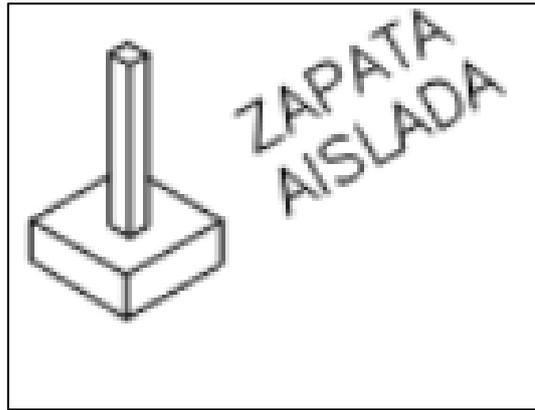


Figura 19. Zapatas aisladas

Fuente: Montoya, J. & Pinto, F. (2010).

Para el suelo se la zona II y III de la Figura 15, cuyo suelo predominante es arenas, por lo cual el riesgo de la presencia de la licuación es evidente; entonces las estructuras de cimentación óptimas para este tipo de suelo son las siguientes:

Zapatas conectadas: Debido al comportamiento de asentamiento y punzonamiento característicos de los suelos arenosos, el uso de elementos estructurales que conecten las zapatas para evitar la distorsión angular entre estas, debe ser obligatorio y óptimo para evitar futuros daños a la estructura. El elemento estructural que conecta este tipo de zapatas se denomina viga de cimentación. En la Figura 20 se observa los tipos de zapatas y distribución en las zapatas conectadas.

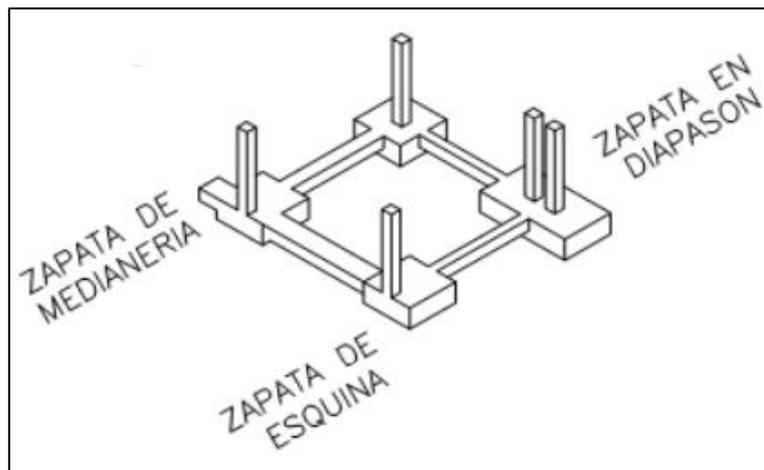
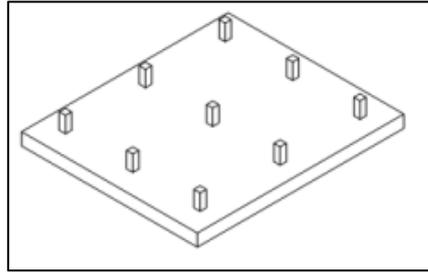


Figura 20. Zapatas conectadas

Fuente: Montoya, J. & Pinto, F. (2010).

Plateas de cimentación: Apto para el comportamiento en algunas partes de Chorrillos donde se presentan asentamientos diferenciales en el suelo por

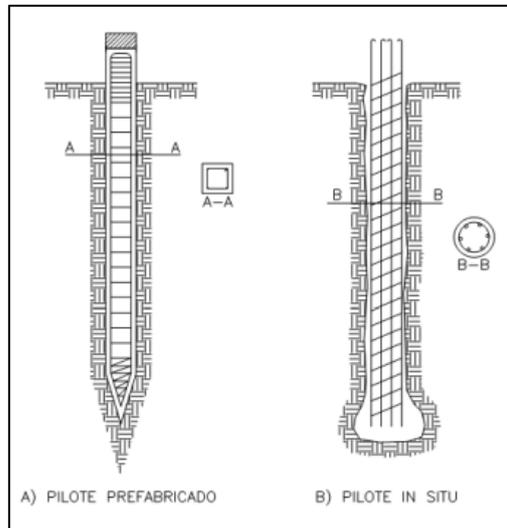
la presencia de las diferentes cargas de la edificación. La Figura 21 muestra la distribución de las columnas en una platea de cimentación.



*Figura 21.* Platea de Cimentación

Fuente: Montoya, J. & Pinto, F. (2010).

Pilotes: La construcción de este tipo de cimentación es apto para suelos muy blandos e inestables como los pantanos que existe en zonas de Chorrillos, pero está limitado solo a construcciones de gran magnitud como edificios, el detalle se observa en la Figura 22. En cambio, existe la probabilidad de que se ejecuten el uso de micropilotes para edificaciones pequeñas las cuales para Meneses (2019) menciona que la principal diferencia radica en los diámetros máximos de estos pilotes que son de 300mm.



*Figura 22.* Pilote

Fuente: Montoya, J. & Pinto, F. (2010).

Anclajes: Este tipo de estructura se usa para el sostenimiento en excavaciones profundas de cimentaciones donde el suelo aledaño presenta peligro de derrumbe eminente, debido a la profundidad y al tipo de suelo

de baja cohesión. Las partes de este método se observa en la siguiente Figura 23.

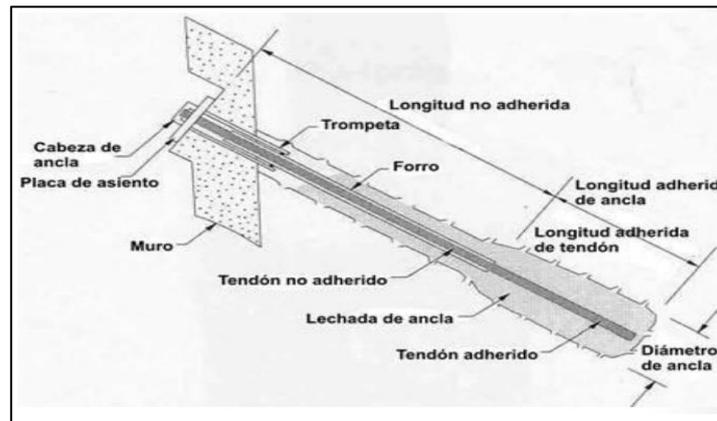


Figura 23. Detalle de instalación de Anclaje

Fuente: Muñoz, A. J. (2011).

En el proceso de la colocación del anclaje, primeramente, se perfora mediante rotación o rotoperusión el suelo con una inclinación especificada en el Expediente Técnico (ET), luego se colocará la tubería y se instala el anclaje, para luego colocar la inyección de lechada y simultanea extracción de la tubería, finalmente se hace el tensado del anclaje luego de 72 horas.

#### 2.4. Definición de términos básicos

##### *Arenas:*

Villalaz, C. (2004) menciona que las arenas tienen un diámetro que va de 0.05 a 2.00 mm, además que son materiales resultantes de la denudación de rocas o de la trituración de estas, no son comprensibles a tal magnitud como las arcillas y tampoco plásticas.

##### *Licuación:*

Meneses, S. (2019) nos indica que, bajo las cargas estáticas y cíclicas, los suelos secos no cohesivos tienden a densificar. Ahora bien, si los suelos se encuentran saturados, la tendencia a densificar causa un incremento en las presiones de poro, el cual no puede ser disipado rápidamente provocando una disminución en los esfuerzos efectivos; cuando esto ocurre, la resistencia de corte alcanza valores nulos o prácticamente nulos, y el suelo comienza a comportarse como un fluido. En este punto se considera el suelo ha licuado.

*Amplificación sísmica:*

Según Santibáñez (2006) la amplificación en el movimiento del suelo se produce cuando tiene un período natural de vibración que coincide con el período de las ondas sísmicas, lo que se conoce como resonancia y esto genera un aumento considerable en la amplitud de las vibraciones del suelo.

*Suelo saturado:*

Para Meza, V. E. (2011) esta condición, se presenta en suelos ubicados bajo el nivel de agua freática, donde las fases presentes son: sólida y líquida, es decir, que los espacios vacíos de los poros del suelo están ocupados por el líquido que generalmente es agua.

## **CAPÍTULO 3: SISTEMA DE HIPÓTESIS**

### 3.1. Hipótesis general

Las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos mitigan los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima 2022.

### 3.2. Hipótesis específicas

- a) La técnica de columna de grava mitiga el aumento de la presión de poros, y los asentamientos.
- b) La técnica de inclusiones rígidas mitiga el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.
- c) La técnica de Jet Grouting mitiga el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.

### 3.3. Variables

#### 3.3.1. Variable dependiente

Efectos de la licuefacción.

#### 3.3.2. Variable independiente

Técnicas de mejoramiento.

### 3.4. Operacionalización de la variable

Las variables antes mencionadas se pueden medir, por indicadores y estas a su vez por índices, tal como se muestra en la Tabla 1, a continuación.

Tabla 1

*Operacionalización de la variable.*

Variable dependiente		Variable independiente	
Efectos de la licuefacción		Técnicas de mejoramiento	
Indicadores	Índices	Indicadores	Índices
Aumento de presión de poros	Nivel freático	Columna de grava	Altura de la Columna de grava Asentamiento
Baja capacidad portante del suelo	Carga actuante de la edificación Carga que soporta la técnica de mejoramiento	Inclusiones rígidas	Capacidad portante Altura de la Inclusión Asentamiento
Asentamientos en cimentaciones	Suelo blando Cargas depositadas	Jet Grouting	Capacidad portante Altura del Jet Grouting Asentamiento

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

### 4.1. Método de la investigación

En el trabajo de investigación hecho por; Rios, A. J. & Rojas J. (2020). Presenta un método Deductivo, porque muestra la línea de pasos, la cual es: primero buscar información, luego plantear la hipótesis para empezar a realizar la operacionalización de las variables y finalmente obtener los resultados y corroborar la hipótesis. La orientación es Aplicada, porque se enfoca en reducir el riesgo de licuación y cumplir los estándares que el proyecto requiere. De igual forma la investigación tiene un tipo de enfoque Cuantitativo, debido a que se hace una recolección de datos y metodologías numéricas de diferentes fuentes, para desarrollar y aplicarlos en el método de las inclusiones rígidas que se requieren en el proyecto. Es de tipo Descriptivo, Correlacional y Explicativo porque explica en primera instancia lo que es la “descripción de la realidad problemática” y la relación que tienen su variable independiente y dependiente. El diseño es de carácter Observacional, Transversal y Retrospectivo; porque está basado en la toma de datos en un determinado tiempo y de fuentes secundarias del pasado. El estudio del diseño es de cohortes, porque es de causa-efecto, ya que estudia el desarrollo de las inclusiones para solucionar el problema principal que es la licuación.

El trabajo de investigación realizado por: Espinoza, C. E. & Torres, C. M. (2019). Muestra un método Deductivo, porque recopila datos para presentar una hipótesis al problema que es la colapsabilidad del suelo y la baja resistencia que esta tiene. Tiene una orientación Aplicada, porque se orienta en resolver el problema mediante compactaciones dinámicas e inclusiones rígidas. Por otro lado, esta investigación tiene el tipo de enfoque Cuantitativo, porque desarrolla las soluciones para el problema mediante las dos técnicas de mejoramiento de suelo, aplicando procesos y métodos numéricos y analíticos. Es de tipo Descriptivo y Correlacional, debido a que explica y relaciona sus variables, y de igual forma describe lo que vienen a ser su problemática. Tiene un diseño Observacional, Transversal y Retrospectivo; porque detalla el proceso de la implementación de las compactaciones dinámicas e inclusiones rígidas, y a su vez se basa en estudios de otros autores previos a la investigación. El estudio de diseño es de cohortes

porque evalúa y desarrolla las dos técnicas de mejoramiento del suelo para solucionar el problema de la colapsabilidad y baja resistencia del suelo.

Este trabajo de investigación hecho por: Suárez, S. M. & Uribe, A. P. (2020). La tesis tiene el método Deductivo, porque está basado en la recopilación de datos, para formular la hipótesis y finalmente plantear las soluciones al problema y corroborar la hipótesis inicial. Presenta una orientación Aplicada, porque brinda alternativas de solución para mejorar el suelo licuable de la Base Naval del Callao. Es de enfoque Cuantitativo y tipo descriptivo porque muestra alternativas de mejoramiento del suelo para mitigar la licuefacción. Es de carácter Observacional, Transversal y Retrolectivo, porque recolecta datos en un determinado tiempo y de fuentes del pasado. Tiene un estudio de diseño de Cohortes, porque la causa es el mejoramiento de suelo mediante técnicas y el efecto es la mitigación de la licuefacción del suelo de la Basa naval del Callao.

En el trabajo de investigación realizado por: Nieto, J. J. & Tolentino, M. A. (2021). Presenta un método Deductivo, debido a que se basa en la formulación del problema y la hipótesis en base a estudios, para que luego se llega a la solución del problema y así comprobar la validez de la hipótesis. La orientación es Aplicada y tiene enfoque Cuantitativo. Es de tipo Descriptivo y Correlacional, porque se explica los parámetros del comportamiento del suelo y las mejoras que tiene el suelo luego del uso de la técnica de mejoramiento. Es Observacional, Transversal y Retrospectivo, porque la toma de sus datos es en un determinado tiempo y se tiene como referencia fuentes anteriores a la investigación. Es de estudio de diseño Cohortes, porque se plantea y desarrolla la técnica de mejoramiento de inclusiones rígidas y su efecto en el suelo inestable del Callao.

En este trabajo de investigación hecho por: Medina, P. M. (2018). Presenta el método Deductivo, ya que formula un planteamiento del problema junto con las hipótesis en base a la información recopilada. Tiene orientación Aplicada, porque en base a dos métodos: Micropilotes e Inclusiones rígidas, demuestra el efecto positivo que tienen sobre el suelo licuable del Centro Integral de Atención al Adulto Mayor (CIAM la Punta). Es de enfoque Cuantitativo, porque aplica y demuestra las dos técnicas ya mencionados sobre un suelo licuable. Es de tipo Descriptivo, Correlacional y Explicativo, porque desarrolla el planteamiento de la realidad problemática con respecto a la licuación en esta zona y también lo explica las dos técnicas, donde profundiza la inclusión rígida por su mejor efectividad con

respecto a los micropilotes. El diseño es Observacional, Transversal y Retrospectivo, porque observa y toma datos de un determinado tiempo y de fuentes del pasado. El estudio del diseño es Cohortes, porque estudia y demuestra el efecto que tiene las inclusiones rígidas sobre el suelo licuable.

En la siguiente Tabla 2, se muestra el resumen de la tipología de los autores antes mencionados.

Tabla 2

*Resumen Tipología de otros autores*

	TIPOLOGÍA					
	Método	Orientación	Enfoque	Tipo	Diseño	Estudio de Diseño
Ríos, A. J. & Rojas J. (2020)	Deductivo	Aplicada	Cuantitativa	Descriptivo Correlacional Explicativo	Observacional Transversal Retrospectiva	Cohortes (causa-efecto)
Espinoza, C. E. & Torres, C. M. (2019)	Deductivo	Aplicada	Cuantitativa	Descriptivo Correlacional	Observacional Transversal Retrospectiva	Cohortes (causa-efecto)
Suárez, S. M. & Uribe, A. P. (2020)	Deductivo	Aplicada	Cuantitativa	Descriptivo	Observacional Transversal Retrospectiva	Cohortes (causa-efecto)
Nieto, J. J. & Tolentino, M. A. (2021)	Deductivo	Aplicada	Cuantitativa	Descriptivo Correlacional	Observacional Transversal Retrospectiva	Cohortes (causa-efecto)
Medina, P. M. (2018).	Deductivo	Aplicada	Cuantitativa	Descriptivo Correlacional Explicativo	Observacional Transversal Retrospectiva	Cohortes (causa-efecto)

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1. Método

Con la recopilación de la información en tesis y artículos de métodos deductivos, este trabajo de investigación fue del método Deductivo, debido a que se acopla a las características de este método perfectamente; por ello, primeramente, se buscó la información teórica del problema a tratar que es ¿Cómo las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos ayudan a mitigar los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos,

Lima año 2022?; luego con la información se planteó una posible hipótesis para empezar el estudio la cual fue “Las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos mitigan los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima 2022”, después se empezó a operacionalizar las variables del estudio, para finalmente solucionar el problema que primeramente se propuso y corroborar la hipótesis.

#### 4.1.2. Orientación

La orientación de la investigación, con la información de tesis y artículos de orientación aplicada, fue Aplicada, porque se enfocó únicamente en resolver el problema de la licuación en el distrito de Chorrillos, para ello se propuso tres técnicas de mejoramiento y se evaluó si estas mitigan los efectos de la licuefacción.

#### 4.1.3. Enfoque

El enfoque, debido a la información documental encontrada en tesis y artículos de enfoque cuantitativo, fue Cuantitativo, porque se desarrolló el procedimiento para solucionar el problema de la licuación con tres técnicas de mejoramiento de suelo; se enfocó en el planteamiento de metodologías numéricas, para desarrollar el proceso de cada una de estas técnicas, y finalmente llegar a una conclusión de que estas técnicas logran mitigar los efectos de la licuefacción.

#### 4.1.4. Instrumento de recolección de datos

El instrumento de recolección de datos, según la data encontrada en tesis y artículos retrolectivos, fue Retrolectivo; esto principalmente porque se hizo una búsqueda y documentación de metodologías numéricas para explicarlos y citarlos, y con ello sustentar el presente trabajo de investigación.

### 4.2. Tipo de la investigación

El tipo de investigación, con fundamentación en tesis y artículos encontrados en su mayoría descriptivas, correlacionales y explicativos; fue Descriptiva, Correlacional y Explicativo; fue descriptiva porque se hizo una descripción de la realidad problemática donde se detalló el problema sobre la licuación del suelo en el distrito de Chorrillos y como esta afecta a las estructuras que se depositan sobre el suelo. Fue correlacional porque existe relación entre la variable independiente y dependiente, es decir, las técnicas de mejoramiento en el suelo, evitan el riesgo

de la zona que es la licuación. Fue explicativo, porque se explicó el desarrollo del problema de la licuación en el distrito de Chorrillos y de igual forma se abarcó y explicó las posibles causas del problema.

#### 4.3. Nivel de la investigación

El nivel de la investigación, en base a la información de tesis y artículos descriptivas, fue Descriptiva, porque se basó en estudios previos de la mitigación y prevención de la licuación, donde se detallan métodos de desarrollo para mejorar las características del suelo, estos métodos se basan en ensayos de laboratorio sobre el efecto de algunos aditivos como: materiales granulares, cemento, agua, aire, etc.; que sirvieron para el proceso de desarrollo de las técnicas de mejoramiento de suelos arenosos para mitigar la licuefacción.

#### 4.4. Diseño de la investigación

En base a la data recopilada de tesis y artículos cuyos diseños eran observacional, transversal y retrospectivo:

Según el proceso del estudio fue Observacional, porque se observó y detalló el proceso de la implementación de las técnicas de mejoramiento sobre el suelo arenoso del distrito de Chorrillos.

Según el número de mediciones fue Transversal, porque dentro de los procesos del desarrollo de las técnicas de mejoramiento, se tomó datos del suelo y las características de los materiales solo una vez.

Según la cronología de las observaciones fue Retrospectivo, porque se tomó los datos bibliográficos de fuentes científicas como artículos, tesis e investigaciones del pasado, es decir de fuentes de terceros.

El estudio se basó en el de Cohortes (Causa-Efecto), porque se desarrolló las técnicas de mejoramiento del suelo, para lograr el efecto de mitigar los efectos de la licuefacción del suelo.

#### 4.5. Población y muestra

##### 4.5.1. Población

La población según la data recopilada de tesis y artículos fue: Técnicas de mejoramiento de suelos.

##### 4.5.2. Muestra

Con la información de muestreo recopilada de tesis y artículos:

Se desarrolló el Muestreo Intencionado, donde las técnicas de mejoramiento se delimitaron en enfocarse sobre suelos arenosos y mitigar

la licuación en estos suelos; se escogió tres técnicas, las cuales son: Técnica de mejoramiento Columna de grava, Técnica de mejoramiento Inclusiones rígidas y Técnica de mejoramiento Jet Grouting.

En la siguiente Tabla 3 se muestra las diferentes técnicas de mejoramiento que se desarrollan en las obras de construcción.

Tabla 3

*Técnicas de mejoramiento para diferentes suelos.*

Técnicas de mejoramiento	Tipo de suelo a mejorar
Vibro compactación	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Columna de Grava	Gravas, Arenas y Limos
Compactación con explosivos	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Jet Grouting	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Compactación dinámica	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Inclusiones rígidas	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Tratamiento Térmico	Limos y Arcillas
Estabilización con aditivos	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas
Precargas	Gravas, Arenas, Limos y Arcillas

Fuente: Yepes, V. (2019).

#### 4.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

##### 4.6.1. Instrumentos de recolección de datos

Con la información de instrumentos de recolección de datos documentada en tesis y artículos se tuvo lo siguiente:

La recolección de datos para la metodología numérica se hizo mediante la búsqueda por medio de la Internet de fuentes bibliográficas, como las páginas de Scopus, Elsevier, E-libro, Knovel; las cuales son fuentes confiables de información sobre informes, investigaciones, artículos y tesis referidos a la “licuación” y “técnicas de mejoramiento de suelos arenosos”.

Los instrumentos, fueron por medio de guías, tablas y fórmulas propuestas de metodologías numéricas obtenidas de artículos científicos publicados en la web.

Las herramientas se obtuvieron por medio de metodologías de Asiri National Project (2011), Coduto, D. P. (2001), Vesic, A. (1977), Combarieu (1988), Karahan, G., & Sivrikaya, O. (2018), la norma peruana

de suelos y cimentaciones NTE 050 y la Norma de diseño sismorresistente NTE 030.

El procesamiento de datos se hizo por medio de programas como: Excel, Word, Google Earth y Google Maps.

#### 4.6.2. Métodos y técnicas

Se utilizó el método de recolección de metodologías numéricas de la Web sobre tesis y artículos, se utilizó los métodos y criterios ingenieriles para el diseño de las técnicas de mejoramiento de suelo.

#### 4.7. Descripción de la recolección de datos

Se recopiló datos generales de la zona de Chorrillos del Informe de Microzonificación Sísmica del CISMID (2011) y de las Características Geotécnicas CISMID (2010). donde se obtuvo gráficos, figuras, calicatas y textos; referentes a la estratigrafía, zonas de riesgo sísmico y tipos de viviendas. Con los datos recolectados en las metodologías numéricas obtenidas por los autores anteriormente mencionados en las Herramientas, se llegó a presentar los diseños de las técnicas mejoramiento y los efectos positivos sobre la licuación del suelo en el Capítulo 5.

La metodología usada para el Diseño de la Columna de grava fue la propuesta por Richards et al. (1993), Hynes & Franklin (1984), Saragoni (1993) y Priebe, H. J. (1995).

La metodología usada para el Diseño de las Inclusiones rígidas fue la propuesta por Asiri National Project (2011).

La metodología usada para el Diseño del Jet Grouting fue la propuesta por Karahan, G., & Sivrikaya, O. (2018), Coduto, D. P. (2001) y Vesic, A. (1977).

## CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LAS TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO

### 5.1. Descripción del proyecto

El proyecto, para el desarrollo del diseño de las tres técnicas, se ubica en la Urbanización La Encantada del distrito de Chorrillos, Lima. En la zona se cuenta con estudios de suelo con calicatas hechas en el año 2010 por el CISMID. El desarrollo del mejoramiento del suelo mediante las técnicas se basó en el estudio de licuación realizado por Farina, H. & Huapaya, O. M. (2019) donde ubicaron que esta zona si presentaría licuación ante un futuro evento sísmico, debido a que la mayor parte de la zona de La Encantada presenta depósitos de arena húmeda y desde os 2.4 m es saturada tal como se observa en las calicatas del proyecto.

El proyecto de edificación tendrá una Carga actuante sobre el terreno de 0.105 kg/cm<sup>2</sup>, este dato se obtuvo del trabajo de investigación de Farina, H. & Huapaya, O. M. (2019) donde realiza un dimensionamiento y metrado de cargas de una edificación de tres pisos destinada para un centro comercial.

Para el diseño de las Técnicas de Mejoramiento del Suelo se tomó las calicatas E44 y E46 como se muestra en la Figura 24.

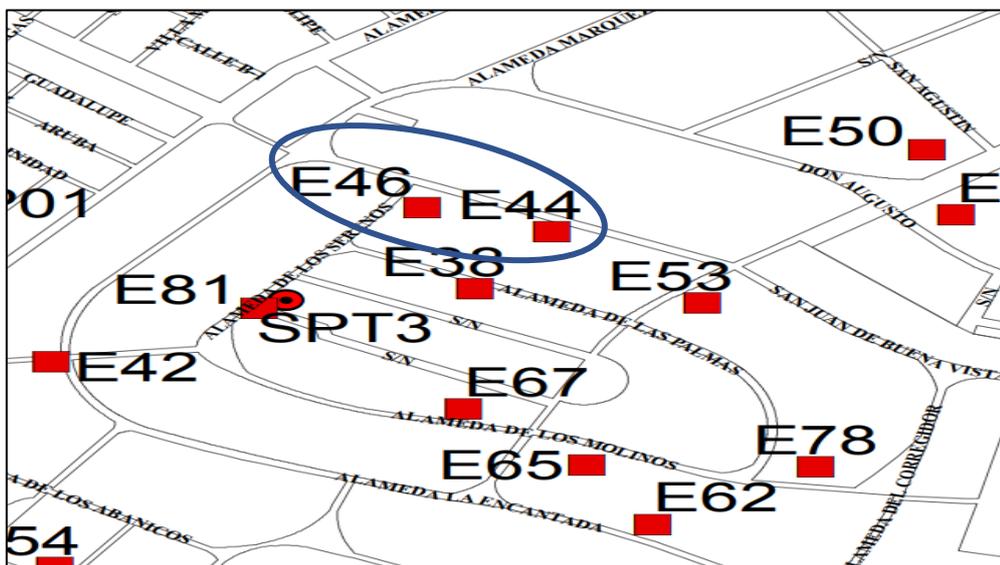


Figura 24. Estudios de suelo con calicatas en La Encantada.

Fuente: CISMID (2010).

Las calicatas se pueden observar en el Anexo 3 y Anexo 4; se idealizó una sola estratigrafía en función de las dos, para la realización de los diseños de las técnicas de mejoramiento. En la Estratigrafía de la Figura 25 se observa las dos primeras

capas que son colocadas durante el proyecto, estas son Relleno y Capa portadora cuyos datos de Pesos Unitarios fueron definidos como ‘Arenas densas con tamaño de grano uniforme’ obtenidos de las tablas propuestas por Hoek, E. & Bray, J. W. (1991) del Anexo 5. Las dos últimas capas son propias del terreno, estas son Arena fina Limosa-Densa y Arena ligeramente Limosa-Densa-Húmeda; para la penúltima capa se realizó un promedio de Pesos unitarios y Ángulos de fricción, ya que en las calicatas E44 y E46 en esta capa hay dos tipos de suelo muy parecidos tal como se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4

*Promedio para la capa Arena fina Limosa-Densa*

Arena fina Limosa-Densa			
	Peso unitario	Angulo de fricción	Cohesión
Arena fina Limosa Densa 1	18 $KN/m^3$	40°	0 $KN/m^2$
Arena fina Limosa Densa 2	17 $KN/m^3$	35°	0 $KN/m^2$
PROMEDIO	17.5 $KN/m^3$	37.5°	0 $KN/m^2$

Fuente: Elaboración propia.

Mientras que para la última capa se utilizó para el Peso unitario el valor propuesto por Hoek, E. & Bray, J. W. (1991) con definición de ‘Arena densa de diferentes tamaños de grano’ y para el ángulo de fricción se utilizó el valor propuesto por Gonzalez, A. J. (1999) con definición de ‘Arena fina algo limosa’ del Anexo 6. La estratigrafía idealizada para el desarrollo de las tres técnicas de mejoramiento es la que se muestra en la siguiente Figura 25.

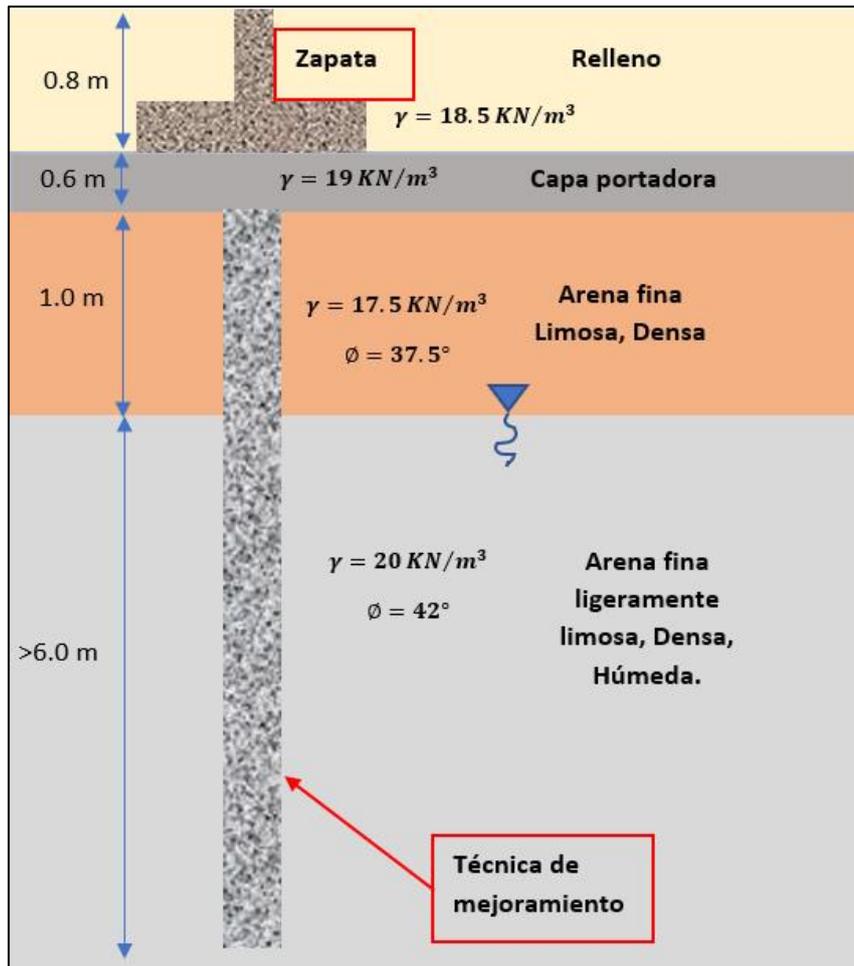


Figura 25. Estratigrafía del suelo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Según el artículo desarrollado por Karahan, G. & Sivrikaya, O. (2018) menciona que el uso de una capa portadora ayuda a transferir uniformemente la carga actuante de la edificación hacia las columnas de mejoramiento de suelo; este material tendrá un espesor de 0.6m y un Peso Unitario de  $19.0 \text{ KN/m}^3$ .

## 5.2. Análisis de asentamiento por sismo

Para realizar el cálculo de asentamiento bajo condiciones sísmicas se tuvo en cuenta el diseño de las zapatas proyectadas, siendo  $B = 2.40 \text{ m}$  y  $D_f = 0.80 \text{ m}$ .

Por otro parte, se consideró que para un suelo granular con un ángulo de fricción de  $37.5^\circ$  y cohesión nula, el coeficiente  $K_v = 0$

Así mismo, para obtener el valor del coeficiente de intensidad sísmica horizontal  $K_h$  se toma en cuenta las restricciones asignadas para la aceleración máxima de Hynes y Franklin (1984) y el de Saragoni (1993). Criterios, ampliamente aceptados por la comunidad científica.

La intensidad sísmica horizontal se ha tomado de forma general en base al estudio de escenario sísmico para Lima metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw proporcionado por INDECI (2017), debido a que la zona de estudio se encuentra dentro de la zona de Alta Sismicidad (Zona 4), donde existe gran probabilidad a que ocurran sismos de intensidades considerables.

Los parámetros que definen cada uno de los tipos de suelos, están en función de lo establecido en la Norma E.030 Diseño sismorresistente. Para caracterizar mejor el peligro, tomando en cuenta un sismo de magnitud 8.8Mw.

En la siguiente Figura 26 se muestra el Mapa de microzonificación sísmica-geotécnica para Lima Metropolitana y Callao, donde se observa que en el distrito de Chorrillos existe zonas de sismicidad desde la más baja de la Zona 1 hasta la más alta de la Zona 4.

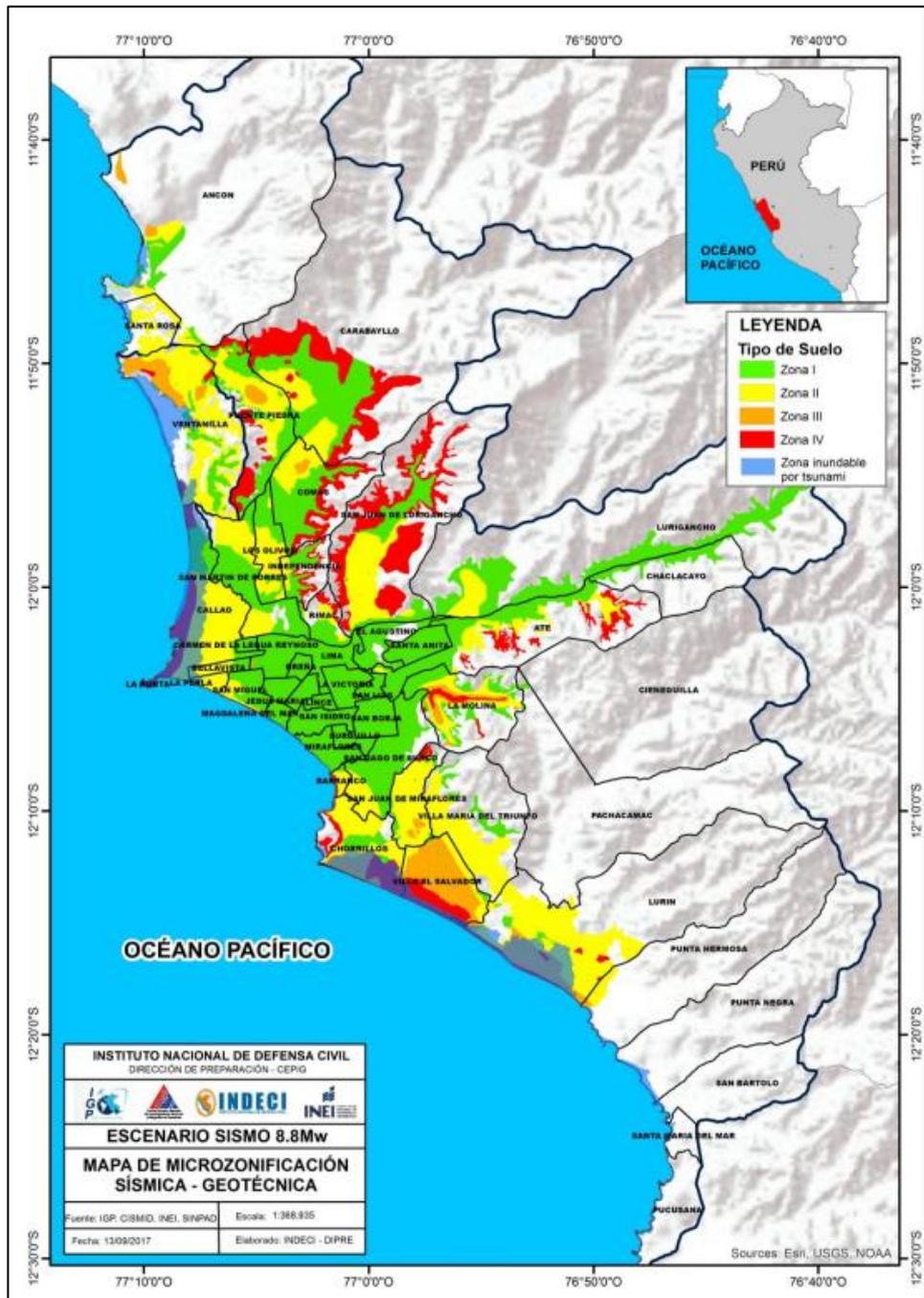


Figura 26. Microzonificación sísmica-geotécnica para Lima Metropolitana y Callao.

Fuente: INDECI (2017).

En la siguiente Tabla 5 se muestra los parámetros según la Zona 4 para el cálculo del asentamiento inicial.

Tabla 5

Parámetros evaluados para la determinación del peligro por sismo

Tipo de suelo	Zona	Amplif. (S)	Acelerac.	Acel. Max.	Periodo
Suelo I	Zona 4	0.80	<i>Pulido et al. (2015)</i>	0.16	0.30
Suelo II	Zona 4	1.00	<i>Pulido et al. (2015)</i>	0.50	0.40
Suelo III	Zona 4	1.05	<i>Pulido et al. (2015)</i>	0.63	0.60
Suelo IV	Zona 4	1.10	<i>Pulido et al. (2015)</i>	0.88	0.10

Fuente: INDECI (2017).

De la Tabla 5 se tomó la aceleración máxima respecto a la zona de estudio, según la investigación de microzonificación sísmica del INDECI (2017) en el distrito de Chorrillos, La zona fue clasificada como un suelo tipo III cuya aceleración máxima resulta ser  $a_{max} = 0.63 \frac{m}{s^2}$ .

Aplicando los criterios de Hynes y Franklin (1984) y el de Saragoni (1993) se calculó el coeficiente de intensidad sísmica en la siguiente Ecuación 2.

Ecuación 2: Coeficiente de intensidad sísmica.

$$Kh = \begin{cases} 0.30 \frac{a_{max}}{g}, & \text{if } a_{max} < 6.6 \frac{m}{s^2} \text{ ó } 0.67g \\ 0.22 \left(\frac{a_{max}}{g}\right)^{0.33} & \text{if } a_{max} \geq 6.6 \frac{m}{s^2} \text{ ó } 0.67g \end{cases} \quad (2)$$

Se tomó el 30% de la aceleración máxima respecto al tipo de suelo, siendo el coeficiente de intensidad sísmica horizontal  $Kh = 0.20$ .

Además, del ábaco de la Figura 27 se obtiene el valor de  $\tan(\alpha_{AE}) = 1.38$ ., con respecto al  $Kh=0.20$  y el Ángulo de fricción  $\phi=37.5^\circ$ .

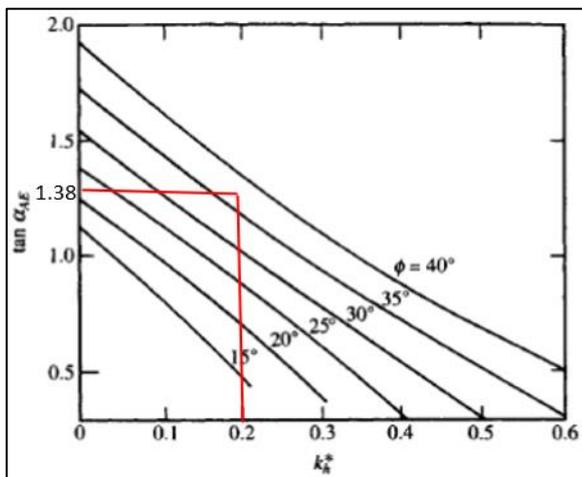


Figura 27. Obtención del valor de  $\tan(\alpha_{AE})$ .

Fuente: Richards et al. (1993).

Así mismo, se toma en cuenta la velocidad máxima del sismo para la zona en estudio siendo  $V = 0.4 \text{ m/s}$  y el coeficiente para aceleración de sismo de diseño  $A = 0.32$ ; estos datos se obtuvieron de la fuente del trabajo de investigación de Farina, H. & Huapaya, O. M. (2019).

En la siguiente Tabla 6 se muestra las características iniciales para el cálculo.

Tabla 6

*Características iniciales*

Descripción	Simbología	Dimensión
Base de cimentación	B	2.4 m
Fondo de cimentación	$D_f$	0.8 m
Angulo de fricción	$\phi$	$37.5^\circ$
Coef. de intensidad sísmica horizontal	$K_h$	0.20
Variación de $K_h$ y ángulo de fricción	$\tan(\alpha_{AE})$	1.38
Coef. de acel. para el sismo de diseño	A	$0.32 \text{ m/s}^2$
Velocidad máxima del sismo	V	$0.4 \text{ m/s}$
gravedad	$g$	$9.81 \text{ m/s}^2$

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos se aplicó la teoría formulada de la Ecuación 1 por Richards et al. (1993).

$$S_{Eq} = 0.174 \frac{V^2}{Ag} \left| \frac{K_h}{A} \right|^{-4} \tan(\alpha_{AE}) \quad (1)$$

$$S_{Eq} = 0.0802 \text{ m} = 8.02 \text{ cm}$$

### 5.3. Diseño de la Columna de grava

Para el diseño de las columnas de grava se utilizó los datos recolectados de la muestra de acuerdo a los ensayos realizados anteriormente.

La altura total del suelo blando de tipo arenoso es de 7m. Se consideró el refuerzo del estrato con inclusiones de columna de grava de 1.00 m de diámetro con 1.50 m de espaciamiento (entre ejes), altura de 7.00 m, con arreglo geométrico de tipo triangular. Se tomó un valor para el ángulo de rozamiento de las gravas ( $\Phi_c$ ) de  $42.5^\circ$ , y coeficiente de poisson en el suelo  $\nu_s$  de  $1/3$ .

La forma que tomaran estas columnas en vista de planta se muestra en la siguiente Figura 28.

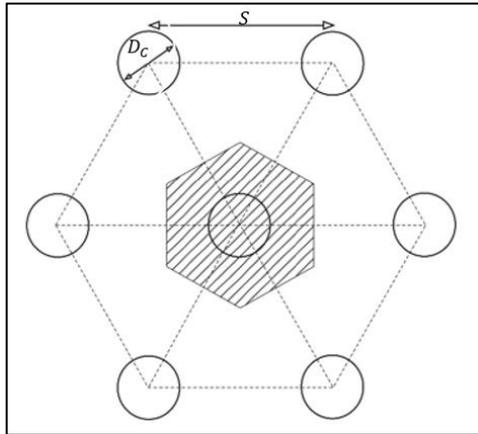


Figura 28. Espaciamiento de las columnas de grava.

Fuente: Elaboración propia

Se empleó el método de Priebe, H. J. (1995) para las ecuaciones y la determinación del factor de mejora de suelos.

Las características de la columna de grava se muestran en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7

*Características de diseño para la columna de gravas.*

Descripción	Simbología	Dimensión
Altura de la columna	$H_c$	7 m
Angulo de fricción - columna	$\phi$	42.5 °
Diámetro de la columna	$d_c$	1.00 m
Área de la columna	$A_c$	0.79 m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente Tabla 8 se muestra los datos extras necesarios para el diseño de la columna de grava.

Tabla 8

*Datos para el diseño de columna triangular (suelo – grava).*

Descripción	Simbología	Dimensión
Separación entre columnas	$S$	1.5 m
Diámetro equivalente	$d_e$	1.58 m
Área de influencia	$A_e$	1.95 m <sup>2</sup>
Razón de sustitución	$a_r$	0.403
Índice de área	$A/A_c$	2.481

Fuente: elaboración propia.

El Área de influencia de la celda unitaria de acuerdo al arreglo geométrico triangular se obtuvo de las siguientes: Ecuación 3 para el diámetro equivalente y Ecuación 4 para el Área de influencia:

Ecuación 3: *Diámetro equivalente.*

$$d_e = 1.05s \quad (3)$$

$$d_e = 1.05 \times 1.50 = 1.58m$$

Ecuación 4: *Área de influencia de la celda unitaria.*

$$A_e = \frac{d_e^2 \times \pi}{4} \quad (4)$$

$$A_e = 1.95 m^2$$

Luego se obtuvo la Razón de sustitución con la Ecuación 5 y el Índice de área con la Ecuación 6:

Ecuación 5: *Razón de sustitución.*

$$a_r = \frac{A_c}{A} = \left(\frac{d_c}{d_e}\right)^2 \quad (5)$$

$$a_r = \left(\frac{1.00}{1.58}\right)^2 = 0.403$$

Ecuación 6: *Índice de área.*

$$\text{Índice de área} = \frac{A}{A_c} \quad (6)$$

$$\text{Índice de área} = 2.481$$

Los parámetros del suelo mejorado se hallaron con las siguientes expresiones de la Ecuación 7 para el Factor de mejora del suelo, la Ecuación 8 para la Función de influencia y la Ecuación 9 para el Coeficiente de empuje activo de la columna:

Ecuación 7: *Factor de mejora del suelo.*

$$n_o = \frac{\text{asiento sin columnas}}{\text{asientos con columnas}} = 1 + a_r \times \left( \frac{\frac{1}{2} + f(v_s, a_r)}{k_{ac} \times f(v_s, a_r)} - 1 \right) \quad (7)$$

Donde:

Ecuación 8: *Función de influencia.*

$$f(v_s, a_r) = \frac{(1-v_s) \times (1-a_r)}{1-2v_s+a_r} \quad (8)$$

Ecuación 9: *Coeficiente de empuje activo de la columna.*

$$k_{ac} = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_c}{2} \right) \quad (9)$$

Se obtuvieron los siguientes resultados en la Tabla 9.

Tabla 9

*Resultados del método de Priebe.*

Descripción	Simbología	Dimensión
Coefficiente de poisson	$\mu_s$	1/3
Razón de sustitución	$a_r$	0.403
Índice de área	$A/A_c$	2.481
Angulo de fricción efectiva - columna	$\phi'_c$	42.5°
Función de influencia	$f(v_s, a_r)$	2.481
Coefficiente de empuje activo de la columna	$k_{ac}$	0.194
Factor de mejora del suelo (Priebe)	$n_o$	<b>4.606</b>
Factor de reducción de asentamientos (1/ $n_o$ )	$\beta$	0.217

Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba que, con la aplicación de columnas de grava de un diámetro de columna de 1.00 m, arreglo geométrico triangular y espaciamiento entre columnas de 1.50 m y altura de 7.00 m. Se obtiene una reducción del asentamiento total en el suelo mejorado un factor de reducción de 0.217.

Según los cálculos anteriores en el suelo sin mejora la reacción del suelo ante la presencia de un sismo; analizado con el método de Richards et al. (1993), se obtiene un asentamiento de  $S = 8.02$  cm. Considerando el factor de reducción de asentamientos  $\beta = 0.217$  se obtiene el resultado del asentamiento reducido en la Ecuación 10:

Ecuación 10: *Asentamiento reducido.*

$$S_c = S \times \beta \quad (10)$$

$$S_c = 8.02 \times 0.217 = 1.74 \text{ cm}$$

El asentamiento en el suelo mejorado ha disminuido en 6.28 cm, lo cual representa una reducción del 78.3 % del valor del asentamiento en el suelo sin mejora.

#### 5.4. Diseño de las Inclusiones rígidas

El diseño de las inclusiones rígidas se basó en la metodología propuesta por Asiri National Project (2011), con esta metodología se calculó primeramente la altura de una Capa de transferencia de carga entre las cimentaciones y las inclusiones rígidas tal como se observa en la siguiente Figura 29.

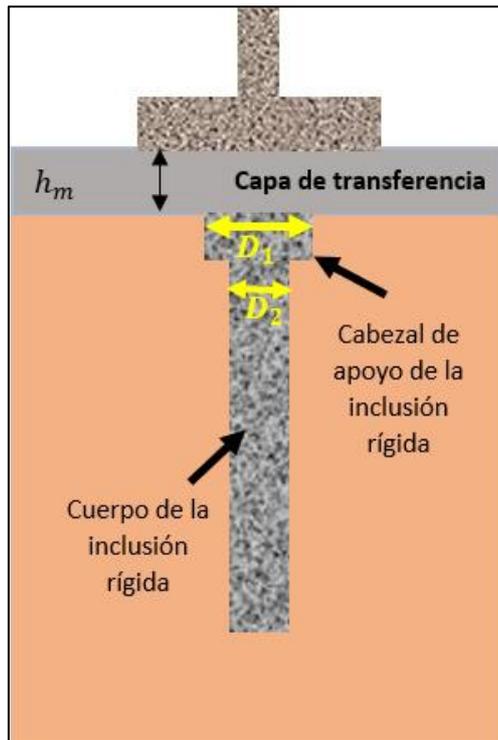


Figura 29. Altura de la capa de transferencia.

Fuente: Elaboración propia.

En el cálculo de la capa de transferencia se definió la variable Ángulo de pirámide inversa “ $\theta$ ”, la cual se forma por la aplicación de la carga de la capa de transferencia sobre la inclusión rígida que provoca una deformación, en la siguiente Figura 30 se observa la formación del ángulo.

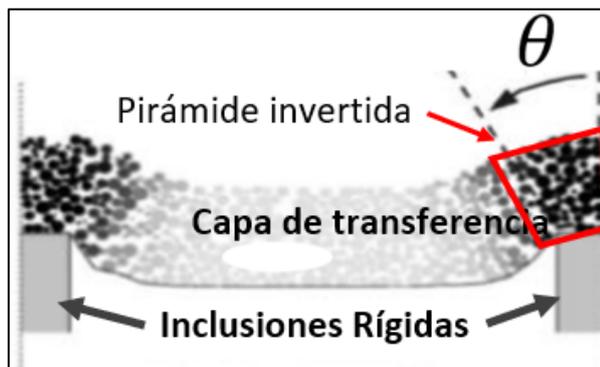


Figura 30. Formación del ángulo pirámide invertida.

Fuente: Gómez, R. (2012).

También se definió la formación de las inclusiones rígidas y la separación entre estas, la formación es cuadrada como se muestra en la siguiente Figura 31.

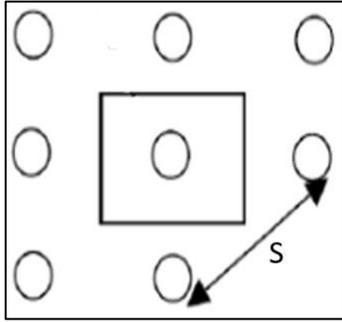


Figura 31. Formación cuadrada de las inclusiones rígidas.

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos mencionados, se aplicó la siguiente Ecuación 11 propuesta por Asiri National Project (2011), para el cálculo del  $h_m$ :

Ecuación 11: *Altura de la capa de transferencia.*

$$h_m \leq h = (S - D_1)/2 \tan \theta \quad (11)$$

Donde:

$h$ : Altura crítica de la capa de transferencia.

$h_m$ : Altura de la capa de transferencia.

$S$ : Separación entre ejes de las inclusiones ( 1.6 m).

$D_1$ ; Diámetro del cabezal de la inclusión ( 0.4 m).

$\theta$ : Ángulo pirámide invertida ( 26°).

$$h = (1.6 - 0.4)/2 \tan 26^\circ$$

$$h = 1.23m$$

Ya definida la Altura crítica, se definió conservadoramente la Altura de la capa de transferencia de 0.6 m.

$$0.6 m < 1.23 m$$

Luego se calculó con el dato del peso unitario " $\gamma$ " de la capa ( $19 \text{ KN/m}^3 \approx 1937.461 \text{ kg/m}^3$ ), Parte del peso de la capa de reparto que soporta las inclusiones, con la siguiente Ecuación 12:

Ecuación 12: *Peso de la capa de reparto soportada por las inclusiones.*

$$W_p = (\gamma/6 \tan \theta) \times ((D_1 + 2h_m \tan \theta)^3 - D_1^3) \quad (12)$$

$$W_p = 590.88 \text{ kg/m}^2$$

Sabiendo que la sobrecarga total de la capa de reparto es de:  $1937.461 \text{ kg/m}^3 \times 0.6m = 1162.48 \text{ kg/m}^2$ .

$$\frac{590.88 \text{ kg/m}^2}{1162.48 \text{ kg/m}^2} \times 100\% = 50.8\%$$

Entonces el 50.8% de la Capa de reparto, es soportada por las inclusiones. También se calculó en la Ecuación 13 Parte de la Carga actuante que soporta las inclusiones “ $Q_p$ ”, sabiendo el valor de la Carga actuante de la edificación  $q_{act}$  de  $0.105 \text{ kg/cm}^2$ .

Ecuación 13: *Carga actuante soportada por las inclusiones.*

$$Q_p = q_{act} \left( \frac{D_1 + 2h_m \tan \theta}{100} \right)^2 \quad (13)$$

$$Q_p = 0.102 \text{ kg/cm}^2$$

Luego:

$$\frac{0.102 \text{ kg/cm}^2}{0.105 \text{ kg/cm}^2} \times 100\% = 97.14\%$$

Entonces el 97.14% de la Carga actuante, es soportada por las inclusiones.

#### *Cálculo del Asentamiento*

Según Combarieu (1988) para el cálculo de asentamientos con inclusiones rígidas primeramente se debe de calcular: la Tensión vertical entre inclusiones en la superficie del suelo de la capa de transferencia “ $q_s^+$ ”, y la Tensión efectiva vertical media a la longitud  $h_m$  “ $\bar{q}$ ”.

El desarrollo de las Tensiones es realizado por las fórmulas propuestas por Combarieu (1988). Los datos necesarios para el cálculo se muestran en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10

*Datos para el cálculo de las tensiones.*

Descripción	Símbolo	Dimensión
Peso unitario de la capa de transferencia	$\gamma$	$1937.461 \text{ kg/m}^3$
Coefficiente en función del $\lambda$ y $b/R$	$m_r$	0.45
Altura de la capa de transferencia	$h_m$	0.6 m
Factor $\lambda$	$\lambda$	0.2
Parámetro $k \tan \delta$	$k \tan \delta$	0.2
Radio del Cabezal de apoyo de la inclusión rígida	$b$	0.2 m
Radio de la inclusión rígida	$R$	0.08 m
Relación entre Radios	$b/R$	2.5

Fuente: Elaboración propia.

El valor del parámetro  $ktan\delta$  se obtuvo con la información propuesta por Asiri National Project (2011) en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11

Valores recomendados para el parámetro  $Ktan\delta$ .

Valores recomendados para el parámetro $ktan\delta$	
Pilotes o inclusiones ejecutados por desplazamiento o bajo presión, en suelos de grano fino de consistencia blanda o líquida o en suelos orgánicos.	0.20
Pilotes o inclusiones perforados en suelos de grano fino de consistencia blanda a líquida o en suelos orgánicos.	0.15
Pilotes o inclusiones ejecutados por desplazamiento o bajo presión en suelos de grano fino de firme a rígida consistencia.	0.30
Pilotes o inclusiones perforados en suelos de grano fino de consistencia firme a rígida.	0.20
Pilotes o exclusiones ejecutados por desplazamiento o perforados en arena o grava.	0.35-1

Fuente: Asiri National Project (2011).

El valor del factor  $\lambda$ , se obtuvo con el gráfico que propone el autor Gómez, R. (2012), en la siguiente Figura 32 se muestra el factor  $\lambda$  hallado con respecto al  $ktan\delta$  calculado anteriormente.

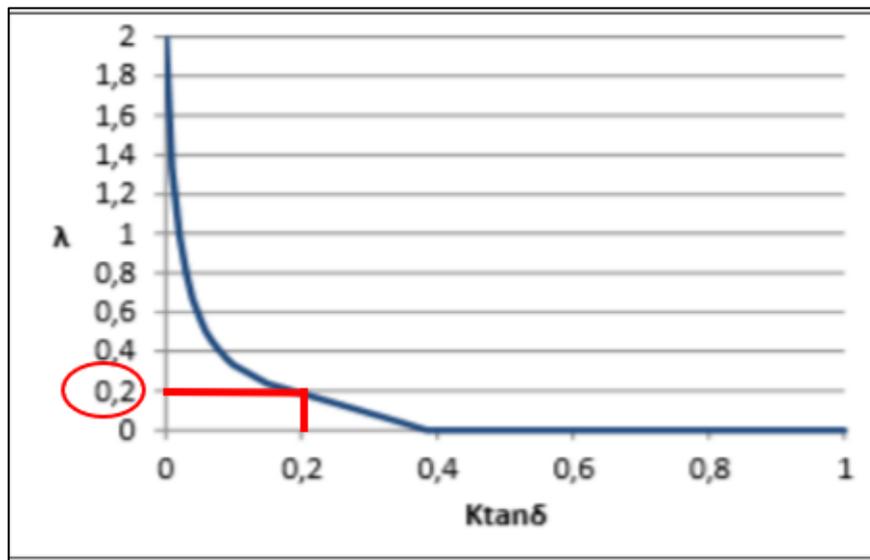


Figura 32. Obtención del factor  $\lambda$ .

Fuente: Gómez, R. (2012).

Luego el valor de la Relación entre Radios  $b/R$ , se obtuvo de la siguiente forma:

$$b = \frac{D_1}{2} = \frac{0.40m}{2} = 0.2m$$

$$R = \frac{D_2}{2} = \frac{0.16m}{2} = 0.08m$$

Con los valores de Relación de Radios y el Factor  $\lambda$ , se procedió a calcular el coeficiente  $m_r$  con el siguiente gráfico de la Figura 33.

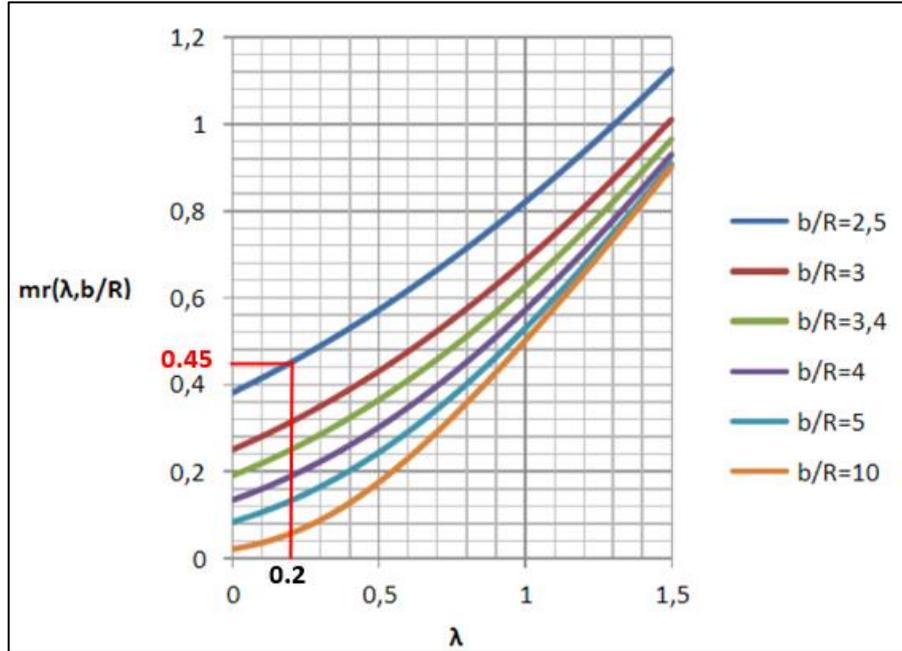


Figura 33. Obtención del coeficiente  $m_r$ .

Fuente: Gómez, R. (2012).

Con los datos definidos, se procedió a calcular el valor de la Tensión vertical entre inclusiones en la superficie del suelo de la capa de transferencia “ $q_s^+$ ”, para ello se aplicó la siguiente Ecuación 14 propuesta por Asiri National Project (2011).

Ecuación 14: *Tensión vertical entre inclusiones en la capa de transferencia.*

$$q_s^+ = (\gamma/m_r) \times (1 - e^{-m_r h_m}) \quad (14)$$

$$q_s^+ = 1018.67 \text{ kg/m}^2$$

Luego para el cálculo de la Tensión efectiva vertical medio a la longitud  $h_m$  “ $\bar{q}$ ”, primero se obtuvo el valor de  $m_r \left(0, \frac{b}{R}\right)$ , en el siguiente gráfico de la Figura 34.

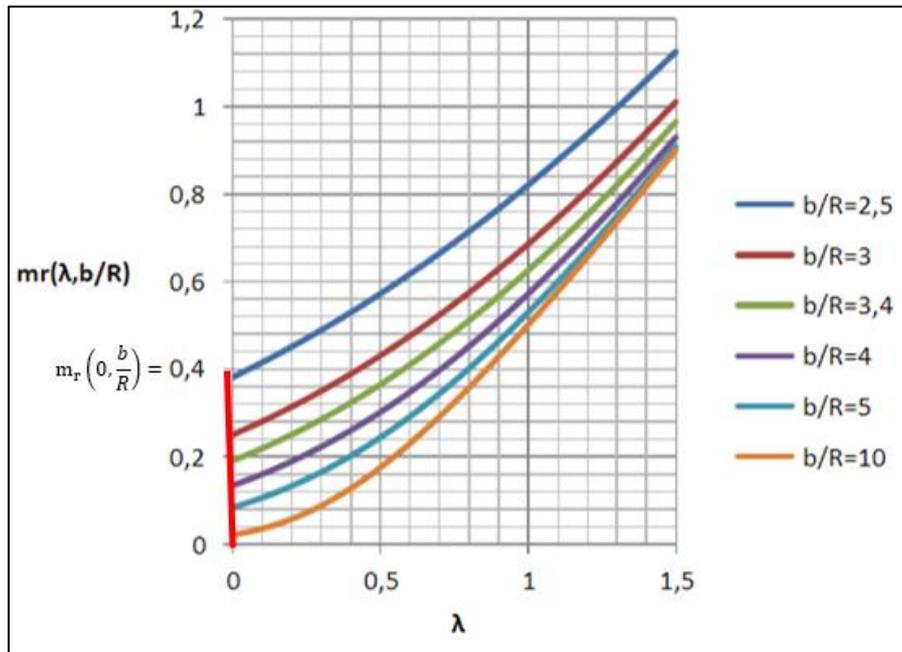


Figura 34. Cálculo del  $m_r\left(0, \frac{b}{R}\right)$ .

Fuente: Elaboración propia.

Con el valor de  $m_r\left(0, \frac{b}{R}\right) = 0,4$ , se procedió a calcular el  $\bar{q}$ , con la siguiente Ecuación 15.

Ecuación 15: *Tensión efectiva vertical medio a la longitud  $h_m$ .*

$$\bar{q} = \left[ 1 - \frac{m_r\left(0, \frac{b}{R}\right)}{m_r} \right] \left[ \frac{\gamma h_m}{2} + q_s^+ \right] + \left[ \frac{m_r\left(0, \frac{b}{R}\right)}{m_r^2} \right] \left[ \frac{q_s^+}{h_m} \right] \quad (15)$$

$$\bar{q} = 3434.84 \text{ kg/m}^2$$

Para el cálculo del Asentamiento final de las inclusiones, este se desdobló en dos tipos de asentamiento: Una producida por la Capa de transferencia y otra por la Capa licuable.

En el Asentamiento de la capa de transferencia " $\Delta h_m$ ", fue necesario los valores de Índice de compresión  $C_c$  y el Índice de vacíos  $e_0$  de la capa de transferencia. Estas se obtuvieron con la definición de Arena con Grava de la siguiente Tabla 12.

Tabla 12

Valores de  $C_c$  y  $e_0$  para suelos.

Material	$C_c$	$e_0$
Arena con grava	0.001	0.3
Arena fina densa	0.005	0.5
Arena fina suelta	0.01	0.7
Limo grueso	0.02	0.8
Limo arcilloso	0.03-0.06	0.9-1.2
Arcilla caolinítica	0.1	1.5
Arcilla momtmorillonitica	0.5	5
Turba	1	10

Fuente: Cruz, L. G. (2017).

Con los valores de  $C_c$  y  $e_0$ , se calculó en la Ecuación 16 el valor de Asentamiento de la capa de transferencia “ $\Delta h_m$ ” hasta la profundidad  $h_m$ .

Ecuación 16: Asentamiento de la capa de transferencia.

$$\Delta h_m = \frac{C_c}{1+e_0} + \log \frac{2\bar{q}}{\gamma h_m} \quad (16)$$

$$\Delta h_m = 0.77 \text{ cm}$$

Para el cálculo del Asentamiento producido por la capa licuable de suelo  $\Delta H$ , fue necesario la altura de esta capa; por ello se basó en la estratigrafía de la calicata E46 que se encuentra cerca al proyecto. Tal como se muestra en la siguiente Figura 35.



Figura 35. Altura de la capa licuable.

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño fue necesario el valor del Peso unitario de esta capa licuable “ $\gamma_L = 20 \text{ KN/m}^3 \approx 2039.432 \text{ kg/m}^3$ ”, también los nuevos valores de  $C_c$  y  $e_0$  que son, para la definición de Arena fina densa, 0.005 y 0.5 respectivamente, las cuales se obtuvieron de la Tabla 12.

El Asentamiento producido en la capa de suelo licuable “ $\Delta H$ ” el cual está a la profundidad de 2.4m y tiene un espesor “ $H$ ” de 0.8m, se calcula con la siguiente Ecuación 17.

Ecuación 17: *Asentamiento producido en la capa de suelo licuable.*

$$\Delta H = \frac{c_c}{1+e_0} \log \left\{ 1 + \left[ \frac{2q_s^+}{\gamma_L(H+h_m)} \right] \left[ \frac{1-m_r \left( 0, \frac{b}{R} \right)}{1-m_r} \right] \right\} \quad (17)$$

$$\Delta H = 0.085cm$$

Finalmente, el valor del Asentamiento Final de las Inclusiones Rígidas  $\Delta(H + h_m)$  fue la suma de los dos asentamientos:

$$\Delta(H + h_m) = 0.085cm + 0.77cm$$

$$\Delta(H + h_m) = 0.86cm$$

La altura de la inclusión rígida en base a la estratigrafía de la calicata E46 será de 2.5m, con esta altura se pretende pasar el estrato licuable de 0.8 m y llegar al suelo seguro inmediatamente debajo.

### 5.5. Diseño del Jet Grouting

En el diseño de Las columnas de Jet Grouting se utilizó la metodología propuesta por los autores Karahan, G., & Sivrikaya, O. (2018), con esta metodología se calculó la Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada y el Asentamiento.

Las columnas de Jet Grouting tienen las características mostradas en la Tabla 13.

Tabla 13

*Características de las Columnas de Jet Grouting.*

Características de las columnas de Jet Grouting			
Diámetro de la columna de Jet Grouting	0.40 m	Cantidad de cemento para 1m de longitud	84 kg
Separación entre columnas	1.00 m	Volumen de lechada para 1m de longitud	113 litros
Dosificación del cemento	450 kg/m <sup>3</sup>	Peso específico de la mezcla inyectada	14.61 KN/m <sup>3</sup>
Relación agua/cemento	1	Presión de inyección	450 bares
Número de boquillas	2	Longitud de la columna	7.00 m
Diámetro de boquilla	2.50 mm		

Fuente: Elaboración propia.

La formación será tipo cuadrada al igual que se mostró en el diseño de las inclusiones rígidas en la Figura 31.

En la siguiente Figura 36 se muestra el tipo de técnica de Jet Grouting que se utilizó.

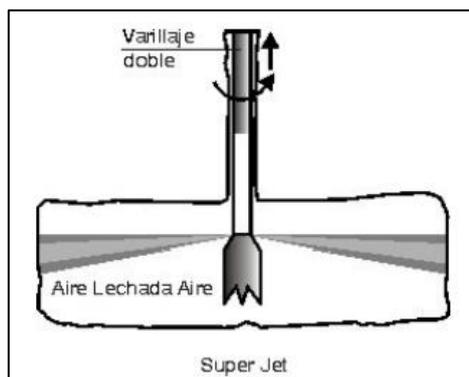


Figura 36. Sistema Super Jet Grouting de doble boquilla.

Fuente: Fernández J. M. (2008).

*Cálculo de la Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada “ $Q_{adm}$ ”*

Los datos necesarios para el diseño de la Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada “ $Q_{adm}$ ” de la columna del Jet Grouting se detallan en la siguiente Tabla 14.

Tabla 14

*Datos para el Diseño del Jet Grouting.*

Descripción	Simbología	Dimensión
Ancho de la base de la columna	$B$	0.40 m
Diámetro de la base de la columna	$D$	0.40 m
Factor de capacidad de carga	$N_c$	119.67
Factor de capacidad de carga	$N_q$	108.75
Factor de capacidad de carga	$N_\gamma$	171.99
Factor de forma	$K_1$	1.05
Factor de forma	$K_2$	0.98
Cohesión del suelo	$c$	0.00 KN/m <sup>2</sup>
Peso unitario del suelo	$\gamma$	20.00 KN/m <sup>3</sup>
Longitud de la columna	$L$	7.00 m
Tensión geológica efectiva a la profundidad final	$\sigma'$	104.84 KN/m <sup>2</sup>
Coefficiente de presión horizontal del suelo en la columna	$K_S$	0.33
Ángulo de fricción del suelo	$\phi$	42 °
Factor de seguridad	$F_S$	2.5

Fuente: Elaboración propia

Los valores de Factores de capacidad de carga fueron obtenidos de la tabla proporcionada por Terzaghi, K. (1943) donde se calculan respecto al ángulo de fricción de 42°, la tabla se localiza en el Anexo 7.

Los Factores de forma propuestos por Terzaghi, K. (1943) fueron calculados de la Ecuación 18 y Ecuación 19:

Ecuación 18: *Factor de forma 1.*

$$K_1 = 1 + \frac{B N_q}{L N_c} \quad (18)$$

$$K_1 = 1 + \frac{0.40m \cdot 108.75}{7.00m \cdot 119.67} = 1.05$$

Ecuación 19: *Factor de forma 2.*

$$K_2 = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad (19)$$

$$K_2 = 1 - 0.4 \frac{0.40m}{7.00m} = 0.98$$

La Tensión geológica efectiva a la profundidad final, se calculó en base a los datos de la estratigrafía de la Figura 25 y se representa en la siguiente Figura 37.

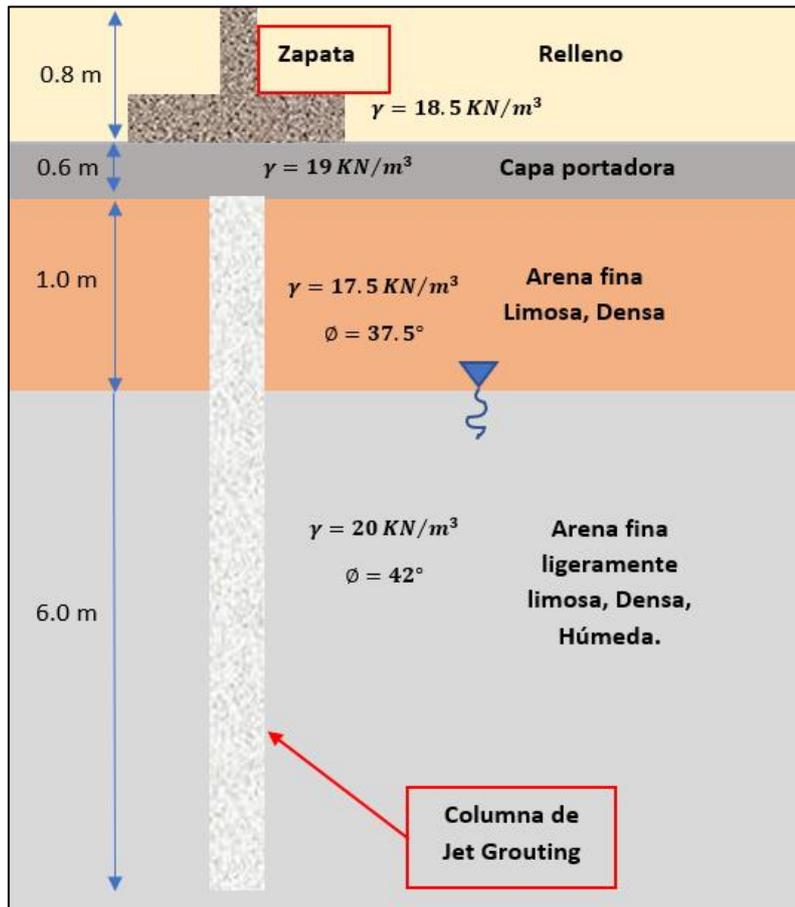


Figura 37. Columna de Jet Grouting en el suelo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la Tensión geológica efectiva a la profundidad final vendría a ser representada en la Ecuación 20:

Ecuación 20: Tensión geológica efectiva.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (20)$$

Donde:

$\sigma'$ : Tensión geológica efectiva.

$\sigma$ : Esfuerzo total.

$u$ : Presión de poros.

Entonces:

$$\sigma = 18.5 \text{ KN/m}^3 \times 0.8\text{m} + 19 \text{ KN/m}^3 \times 0.6\text{m} + 17.5 \text{ KN/m}^3 \times 1.0\text{m} \\ + 20 \text{ KN/m}^3 \times 6.0\text{m} = 163.7 \text{ KN/m}^2$$

$$u = 9.81 \text{ KN/m}^3 \times 6.0\text{m} = 58.86 \text{ KN/m}^2$$

$$\sigma' = 163.7 \text{ KN/m}^2 - 58.86 \text{ KN/m}^2 = 104.84 \text{ KN/m}^2$$

El Coeficiente de presión horizontal del suelo en la columna “ $K_S$ ”, se calculó en base a la Ecuación 21 obtenida de Jaky (1948):

Ecuación 21: *Coeficiente de presión horizontal del suelo en la columna.*

$$K_S = 1 - \text{sen}\phi \quad (21)$$

$$K_S = 1 - \text{sen}42^\circ = 0.33$$

En base a los datos definidos de la columna del Jet Grouting en la Tabla 14, se procedió a calcular la Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada “ $Q_{adm}$ ” para compararlo con la Carga actuante de la edificación de  $0.105 \text{ kg/cm}^2$ . Para ello se utilizó la Ecuación 22 para la Componente de la superficie en la punta final de la columna, Ecuación 23 para la Componente de fricción de la superficie y la Ecuación 24 para el  $Q_{adm}$  propuesta por Coduto, D. P. (2001).

Ecuación 22: *Componente de la superficie en la punta final de la columna.*

$$Q_b = q_b \times A_p = (K_1 c N_c + \sigma' N_q + K_2 \gamma N_\gamma B) \times \left(\pi \frac{D^2}{4}\right) \quad (22)$$

Ecuación 23: *Componente de fricción de la superficie.*

$$Q_s = f_s \times A_s = (K_s \sigma' \tan\phi) \times (\pi DL) \quad (23)$$

Ecuación 24: *Capacidad de carga admisible de la inyección de lechada.*

$$Q_{adm} = \frac{Q_b + Q_s}{FS} \quad (24)$$

Donde:

$Q_b$ : Componente de la superficie en la punta final de la columna.

$Q_s$ : Componente de fricción de la superficie.

$q_b$ : Carga unitaria en la punta.

$A_p$ : Área de la sección transversal de la columna de Jet Grouting.

$f_s$ : Resistencia a la fricción de la columna.

$A_s$ : Superficie del pilote en contacto con el suelo.

Se obtuvo el siguiente valor de  $Q_{adm}$ :

$$Q_b = 1601.69 \text{ KN/m}^2$$

$$Q_s = 274.74 \text{ KN/m}^2$$

$$Q_{adm} = \frac{1601.69 \text{ KN/m}^2 + 274.74 \text{ KN/m}^2}{2.5} = 750.57 \text{ KN/m}^2$$

$$\approx 7.654 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto, el dimensionamiento para la columna de Jet Grouting de las características mencionadas en la Tabla 14, resultan en una Capacidad de carga

admisible de la inyección de lechada de  $7.654 \text{ kg/cm}^2$ , la cual es mayor a la Carga actuante de la edificación sobre el terreno de  $0.105 \text{ kg/cm}^2$ , por ende, el dimensionamiento es válido y satisface las cargas que demanda el proyecto.

$$Q_{adm} > Q_{act}$$

*Cálculo del Asentamiento “S<sub>t</sub>”.*

Los datos necesarios para el diseño de la Asentamiento “S<sub>t</sub>” de la columna del Jet Grouting se detallan en la siguiente Tabla 15.

Tabla 15

*Datos para el cálculo del Asentamiento.*

Descripción	Dato	Valor
Carga puntual aplicada a la columna de Jet Grouting	$Q_a$	9617.94 kg
Diámetro de la columna	$D$	40.00 cm
Área de la sección transversal de la columna de Jet Grouting	$A_p$	1256.64 cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad de la columna	$E_p$	21414.04 kg/cm <sup>2</sup>
Longitud de la columna	$L$	700.00 cm

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo para la Carga puntual  $Q_a$ , se realizó con la siguiente Ecuación 25:

Ecuación 25: *Carga puntual Jet Grouting.*

$$Q_a = Q_{adm} \times A_p \quad (25)$$

$$Q_a = 7.654 \text{ kg/cm}^2 \times 1256.64 \text{ cm}^2 = 9617.94 \text{ kg}$$

El valor del Módulo de elasticidad  $E_p$ , se realizó en base a la información del artículo de Fernández, J. M. (2008) donde propone un factor “ $\alpha$ ” para calcular el Módulo de elasticidad con respecto a la Resistencia a la compresión simple del tipo de suelo tratado; el factor  $\alpha$  se observa en la siguiente Tabla 16.

Tabla 16

*Módulo de elasticidad del suelo tratado por Jet Grouting.*

Tipo de suelo tratado	Arcilla	Arenas Limosas	Arenas y gravas limpias
Resistencia a la compresión simple RCS (MPa)	2-5	3-7	4-15
Módulo de elasticidad $E_p(\text{MPa}) = \alpha \times \text{RCS}(\text{MPa})$	$\alpha = 300$	$\alpha = 700$	$\alpha = 1000$

Fuente: Fernández, J. M. (2008).

De la Tabla 16, se tomó como RCS el valor de 3MPa y el factor  $\alpha$  de 700, con ello se calculó el Módulo de elasticidad en la siguiente Ecuación 26:

Ecuación 26: *Módulo de elasticidad del Jet Grouting.*

$$E_p = \alpha \times RCS(MPa) \quad (26)$$

$$E_p = 700 \times 3MPa = 2100Mpa \approx 21414.04 \text{ kg/cm}^2$$

En base a los datos de la Tabla 15 para el calcular el asentamiento, se utilizó la fórmula empírica propuesta por Vesic, A. (1977) para determinar el asentamiento en la siguiente Ecuación 27:

Ecuación 27: *Asentamiento Jet Grouting.*

$$S_t = \frac{D}{100} + \frac{LQ_a}{A_p E_p} \quad (27)$$

$$S_t = \frac{40cm}{100} + \frac{700cm \times 9617.94kg}{1256.64cm^2 \times 21414.04 \text{ kg/cm}^2} = 0.65cm \approx 6.5mm$$

En el artículo de Alva, J. (2011) menciona que, en edificaciones destinadas para ser centros comerciales, generalmente el asentamiento de las zapatas no debe de superar la 1 pulgada o 2.54cm. Esta información también se basa en la Norma Peruana de cimentaciones. Con lo mencionado se concluye que con el diseño y dimensionamiento de la columna de Jet Grouting, el asentamiento obtenido de 0.65 cm está dentro del límite permisible que es 2.54cm, siendo así correcto el diseño de la columna de Jet Grouting.

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Primero: En base a la investigación de Farina, H. & Huapaya, O. M. (2019) donde mencionan que: “A la profundidad de 2.4m, debido a la presencia de arenas medianamente densas y nivel freático, el estrato de 0.8m de longitud licuaría en un futuro próximo”; se propuso tres técnicas de mejoramiento del suelo en cuya composición y definición, estas técnicas mitigaron: el aumento de presiones de poros, la falta de capacidad portante y los asentamientos.

Segundo: Previo al diseño de las tres técnicas, se calculó el asentamiento inicial que tendría en terreno si no se hiciera el mejoramiento; el resultado obtenido fue de  $8.02\text{cm}$ , el cual es un asentamiento diferencial demasiado excesivo para este tipo de edificación comercial.

Tercero: En la columna de grava debido a su composición de pilas de gravas incrustadas dentro del suelo; esta ayuda a disipar el aumento de presión de poros durante un sismo. En el diseño de estas columnas, el valor calculado con respecto al asentamiento fue de  $1.74\text{cm}$ , este valor está por debajo del valor de los  $2.54\text{cm}$  que se especifica en el artículo de Alva, J. (2011).

Cuarto: En las Inclusiones Rígidas, están compuestas por concreto, el cual ayuda a la disipación de aumento de presión de poros, debido a que densifica el suelo circundante en el momento de la incorporación de la pila sólida de concreto. En el diseño de estas inclusiones, el valor que se obtuvo para la Carga que soporta de la edificación, fue de  $0.102\text{kg}/\text{cm}^2$ , el cual es el 97.14% de la carga total de la edificación del proyecto  $0.105\text{kg}/\text{cm}^2$ , este porcentaje calculado es muy favorable sabiendo que el suelo tiene un estrato licuable que debilita la capacidad portante en general. El valor calculado con respecto al asentamiento fue de  $0.86\text{cm}$ , este valor está por debajo de los  $2.54\text{cm}$  que se especifica en el artículo de Alva, J. (2011), lo cual es un gran punto a considerar.

Quinto: En el Jet Grouting, este método a diferencia del Inclusiones rígidas este compuesto por una mezcla de lechada de concreto y suelo erosionado de las paredes del suelo, el resultado obtenido es el control de la presión de poros, la elevada mejora de la capacidad portante y la reducción de los asentamientos. En el diseño de esta técnica, el valor que se obtuvo para la Carga que soporta de la edificación, fue de  $7.654\text{kg}/\text{cm}^2$ , el cual es mucho mayor a la carga total actuante de la edificación del proyecto de  $0.105\text{kg}/\text{cm}^2$ . El valor calculado con

respecto al asentamiento fue de  $0.65\text{cm}$ , este valor está por debajo de los  $2.54\text{cm}$  requeridos en la información obtenida del artículo de Alva, J. (2011).

Sexto: Con respecto a tomar una decisión de cual Técnica de mejoramiento sería la más favorable técnicamente; teniendo en cuenta los parámetros de control de aumento de presión de poros, capacidad portante y asentamiento. En la siguiente Tabla 17 se muestra cual es la más adecuada técnicamente para elegir de las tres.

Tabla 17

*Comparación de las técnicas de mejoramiento.*

	Aumento de presión de poros	Capacidad portante	Asentamientos	
Columna de grava	Controla el aumento de la presión de poros.	No conlleva la Capacidad portante en el diseño	Tiene un asentamiento de $1.74\text{ cm}$	 <p> <span style="color: red;">■</span> Malo  <span style="color: green;">■</span> Normal  <span style="color: yellow;">■</span> Bueno         </p>
Inclusiones rígidas	Controla el aumento de la presión de poros.	Logra soportar el 97.14% de toda la carga de la edificación.	Tiene un asentamiento de $0.86\text{ cm}$	
Jet Grouting	Controla el aumento de la presión de poros.	Logra soporta más del 100% de toda la carga de la edificación.	Tiene un asentamiento de $0.65\text{ cm}$	

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 17, se deduce que la mejor técnica para el proyecto es la de Jet Grouting, porque controla el aumento de la presión de poros, soporta más del 100% de toda la carga de la edificación y tiene un asentamiento reducido de  $0.65\text{cm}$ .

## CAPÍTULO 7: CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 7.1. Contrastación de la hipótesis general

**Hipótesis general:** Las técnicas de mejoramiento en suelos arenosos mitigan los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima 2022.

La hipótesis es correcta, debido a que en términos generales las tres técnicas de mejoramiento lograron mitigar los efectos de licuefacción, tanto en la reducción de la presión de poros, en la mejora de la capacidad portante y reducción en el asentamiento diferencial final del suelo.

### 7.2. Contrastación de las hipótesis específicas

**Hipótesis específica 1:** La técnica de columna de grava mitiga los efectos de la licuefacción del suelo.

La hipótesis es válida, debido a que la técnica de columna de grava, mitiga los efectos de la licuefacción, porque logra controlar el aumento de presión de poros durante un sismo debido a su composición de gravas y también reduce el asentamiento hasta 1.74 cm para que sea considerado dentro de los parámetros de la Norma Peruana.

**Hipótesis específica 2:** La técnica de inclusiones rígidas mitiga los efectos de la licuefacción del suelo.

La hipótesis es correcta, debido a que las inclusiones ayudan disipar el aumento de la presión de poros, logran soportar en un 97.14% la Carga de la edificación, y además reduce los asentamientos diferenciales a 0.86cm.

**Hipótesis específica 3:** La técnica de Jet Grouting mitiga los efectos de la licuefacción del suelo.

La hipótesis es válida, porque la técnica del Jet Grouting disipa el aumento de la presión de poros, logra soportar más de lo requerido en cuanto a la Carga actuante de la edificación, y tiene asentamientos muy bajos del valor de 0.65cm.

En la siguiente Tabla 18 se muestra, la mitigación de los efectos de la licuefacción del suelo por motivo de la incorporación de las técnicas de mejoramiento.

Tabla 18

*Contrastación de las hipótesis*

Técnicas	Efectos de la licuefacción		
Columna de grava	Aumento de poros	Falta de Capacidad portante	Asentamientos
Inclusiones rígidas	Aumento de poros	Falta de Capacidad portante	Asentamientos
Jet Grouting	Aumento de poros	Falta de Capacidad portante	Asentamientos

 No mitiga  
 Mitiga

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 18, La única técnica que no mitiga la falta de capacidad portante del suelo es la columna de grava.

## CONCLUSIONES

1. Las tres técnicas de mejoramiento en general mitigan los efectos de licuefacción del suelo de aumento de presión de poros, baja capacidad portante y asentamientos; esto permite que el proyecto de la edificación sea seguro durante un futuro sismo.
2. La Columna de grava por su composición logra evitar el aumento de la presión de poros, siendo este el primer efecto de la licuefacción del suelo. Luego con respecto al asentamiento, se reduce hasta el valor de 1.74cm estando dentro de los límites permisibles según la norma.
3. Las Inclusiones rígidas, logran controlar el aumento de la presión de poros debido a que densifica el suelo circundante en el momento de la incorporación de la pila solida de concreto, también ayuda a soportar el 97.14% de la Carga actuante de la edificación, siendo un gran punto a favor de la técnica, ya que los suelos licuables sin mejora suelen tener muy baja capacidad portante. Por otro lado, el asentamiento con la mejora de la técnica fue de 0.86cm, la cual es menor a lo que requiere la Norma Peruana, y también hay una gran diferencia con respecto al valor del asentamiento sin mejora que era de 8.02cm.
4. La técnica del Jet Grouting, logra controlar el aumento de la presión de poros debido a la incorporación de esta lechada y la erosión que produce en su formación, también soporta mucho más de lo requerido en el proyecto en cuanto a la Carga portante, ya que la edificación demanda una carga actuante de  $0.105kg/cm^2$  y el Jet Grouting de este diseño soporta hasta  $7.654kg/cm^2$ . En cuanto al asentamiento obtenido en el diseño del Jet Grouting, esta es de 0.65cm, lo cual está por debajo del requerimiento de la Norma.

## RECOMENDACIONES

1. Para futuras investigaciones relacionadas al estudio de mejoramiento de suelos licuables se recomienda que estas cumplan con los requerimientos mínimos que establece la norma E-050 Suelos y Cimentaciones, ya que en base a la información que se tenga de los ensayos geotécnicos y geofísicos se efectuó un correcto estudio que brinde las posibles técnicas de solución que mitiguen los efectos de licuefacción.
2. Se recomienda que para el análisis de mejora del suelo con columnas de gravas se opte por investigaciones más recientes y complejas que puedan ofrecer resultados analíticos más exactos a la realidad del proyecto; ya que, si bien el método de Priebe proporciona resultados muy cercanos a la realidad, contiene varias hipótesis simplificadoras que puedan alterar los efectos de mejora del suelo.
3. Se sugiere dar seguimiento a los asentamientos del suelo mejorado con la finalidad de poder verificar si esta cumple con los asentamientos mínimos previstos por la Norma.
4. Se propone para futuras investigaciones ejecutar las técnicas de mejoramiento aplicando las 3 técnicas propuestas en el presente trabajo de investigación para otros tipos de suelos y proyectos, con la finalidad de brindar soluciones rápidas en diferentes partes del Perú.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alva, J. (1983). Breve Historia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú [Versión Word]. *Ponencia presentada en el V Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima*, (pág. 12). [http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis16\\_a.pdf](http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis16_a.pdf)
- Alva, J. & Ortiz, C. (2019). Actualización de la ocurrencia del fenómeno de licuación de suelos en el Perú. Artículo de la Universidad Nacional de Ingeniería, Perú. MAPA DE AREAS DE DESLIZAMIENTOS POR ([jorgealvahurtado.com](http://www.jorgealvahurtado.com))
- Alva, J. (2011). Diseño de cimentaciones. Lima. Editorial ICG. Microsoft Word - DISEÑO DE CIMENTACIONES.doc ([jorgealvahurtado.com](http://www.jorgealvahurtado.com))
- Asiri National Project (2011). Recomendaciones para el diseño, construcción y control de mejoras de suelos de inclusión rígida. Francia. IREX. Revista científica. Asiri National Project | PDF | Engineering | Civil Engineering ([scribd.com](https://www.scribd.com))
- Cheng, S., Huang, Z., Zhou, Y., He, J., Yang, F. & Hang, L. (2019). Métodos de desaturación de suelos para la mejora de suelo licuable. *Serie de conferencias IOP. Ciencia e ingeniería de materiales*, 562(1) doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/562/1/012015>
- CISMID (2010). Características geotécnicas del distrito de Chorrillos. Informe de Ingeniería. INFORME INGENIERÍA DE DETALLE ([vivienda.gob.pe](http://vivienda.gob.pe))
- CISMID (2011). Estudio de microzonificación sísmica y vulnerabilidad en el distrito de Chorrillos. Municipalidad Distrital de Chorrillos. *ZonSism\_PautasTecnicas\_CHORRILLOS.pdf* ([cenepred.gob.pe](http://cenepred.gob.pe))
- Coduto, D. P. (2001). Diseño de cimentaciones: principios y prácticas. Boston. Pearson. *Foundation-design-principles-and-practices-Donald-P-Coduto.pdf* ([istasazeh-co.com](http://istasazeh-co.com))
- Combarieu (1988). Cálculo de una cimentación compuesta de pilotes y zapatas bajo carga vertical centrada. Francia. Revista científica. *Fondations Mixtes COMBARIEU | PDF | Fondation (construction) | Mécanique des sols* ([scribd.com](https://www.scribd.com))
- Cruz, L. G. (2017). Cálculo de asentamientos. Ponencia Universidad del Cauca Colombia. *Calculo de asentamientos - PDF Free Download* ([docplayer.es](http://docplayer.es))
- Das, B. (2001). Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Mexico DF. International Thomson Editores.

- Espinoza, C. E. & Torres, C. M. (2019). *Evaluación técnica y económica para el mejoramiento de suelos finos con fines de cimentación, por medio de compactación dinámica e inclusiones rígidas* (Tesis de Pregrado). Universidad Ricardo Palma. Evaluación técnica y económica para el mejoramiento de suelos finos con fines de cimentación, por medio de compactación dinámica e inclusiones rígidas (urp.edu.pe)
- Farina, H. & Huapaya, O. M. (2019). *Formulación De Cimentación Superficial Para Un Centro Comercial De 3 Pisos En Una Zona Con Suelos Licuables En La Encantada – Chorrillos*. [Tesis de título profesional, Universida Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional. Formulación de cimentación superficial para un centro comercial de 3 pisos en una zona con suelos licuables en La Encantada – Chorrillos (upc.edu.pe)
- Fernández, J. M. (2008). Mejora del terreno mediante Super Jet Grouting. Seminario de geomática computacional. Jet\_Grouting\_Juan\_Manuel\_Fernandez.pdf (terratest.cl)
- García, M., Manzanal, D. & Carbajal, E. (2017). Análisis de licuefacción y mitigación con columnas de grava. *Ingeniera Civil 193*. CONICET\_Digital\_Nro.a95f0b8e-b822-481d-a3c8-130c2578ed74\_A.pdf
- Gómez, R. (2012). *Inclusiones rígidas, análisis comparativo de los métodos analíticos y los métodos numéricos*. [Trabajo de investigación para optar el Máster en Geotecnia, Universidad Nacional de Educación Distancia]. (PDF) Inclusiones Rígidas – Análisis Comparativo de los Métodos Analíticos y los Métodos Numéricos (researchgate.net)
- Gonzalez, A. J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. X jornadas geotécnicas de ingeniería colombiana. PHISPTD0.PDF (scg.org.co)
- Hoek, E. & Bray, J. W. (1991). Manual de estabilidad de taludes. Londres. Instituto de minería y metalurgia. Rock Slope Engineering: Third Edition - Evert Hoek, Jonathan D. Bray - Google Libros
- Hynes & Franklin (1984). Rationalizing the seismic coefficient method. Ejército de los Estados Unidos. Revista del Cuerpo de Ingenieros. (PDF) 1984 Hynes-Griffin and Franklin - Seismic Coefficient - PDFSLIDE.NET
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Sistema Estadístico Nacional*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1477/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1477/libro.pdf)

- INDICE (2017). Estudio de escenario sísmico para Lima metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw. Informe de Ingeniería. Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw (indec.gov.pe)
- Jamal, H., & Ivo, H. (2020). Análisis numérico de columnas de piedra para la reducción del riesgo de licuefacción del suelo. *Geotecnología de infraestructura de transporte*, 7(4), 618-633. doi:<https://doi.org/10.1007/s40515-020-00108-9>
- Karahan, G. N., & Sivrikaya, O. (2018). Diseño de columna de rejuntableo a chorro singular para suelos arenosos. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 77(12), 1-11. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7650-9>
- Keller Group (2022). *Jet Grouting Soilcrete*. Keller Cimentaciones. Jet grouting Soilcrete® | Keller Cimentaciones
- Largo, C. M. (2014). Balance de asentamientos diferenciales presentes en edificación con cimentaciones sobre pilotes (Tesis de Pregrado). Universidad de Cartagena. Balance de asentamientos diferenciales presentes en edificación con cimentaciones sobre pilotes (unicartagena.edu.co)
- Medina, P. (2018). *Mejoramiento de terreno en suelo licuable utilizando Inclusiones rígidas [Tesis de título profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]*. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2041>
- Menard España (2018). Técnica Columnas de Grava. [Archivo de vídeo]. (6) Técnica Columnas de Grava - YouTube
- Meneses, S. (2019). *Análisis de sistemas de micropilotes para su uso en suelos licuables [Tesis de título profesional, Universidad de Chile]*. Repositorio Institucional. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174244>
- Meza, V. E. (2011). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. n31a02.pdf (scielo.org.co)
- Montoya, J. & Pinto, F. (2010). Cimentaciones. Cátedra Geotecnia. Universidad de los Andes Venezuela. Microsoft Word - Cimentaciones (wordpress.com)
- Muñoz, A. J. (2011). *Manual para el proceso de diseño y construcción de muros anclados de concreto lanzado. para la obtención de título de tecnólogo. escuela politécnica nacional de quito. [Trabajo de investigación para optar el Título de Tecnólogo, Escuela Politécnica Nacional de Quito]*. Manual para el proceso de diseño y construcción de muros anclados de concreto lanzado (1library.co)

- Norma Técnica E.030 (2019). Diseño Sismorresistente. Norma peruana. d289856\_opt.pdf (www.gob.pe)
- Norma Técnica E.050 (2018). Suelos y cimentaciones. Norma peruana. Publicación Oficial - Diario Oficial El Peruano (construccion.org)
- Nieto, J. J. & Tolentino, M. A. (2021). *Análisis del comportamiento de los suelos blandos aplicando la técnica de inclusiones rígidas por los métodos numérico y analítico* (Tesis de Pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Análisis del comportamiento de los suelos blandos aplicando la técnica de inclusiones rígidas por los métodos numérico y analítico (upc.edu.pe)
- Núñez, F. C. (2017). *Control de asentamientos en terraplenes construidos sobre suelo fino por medio de métodos de mejoramiento de suelos basados en vibro-sustitución*. (Tesis de Pregrado). Universidad Andres Bello. 288902545.pdf (core.ac.uk)
- Órgano Oficial de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (2018). Uso de pilas de grava compactada para mejorar suelos blandos o licuables y diferencia con las columnas de grava vibrada. *Geotecnia*, 33-39. <https://www.smig.org.mx/archivos/revista-trimestral-smig/revista-geotecnia-smig-numero-248.pdf#page=35>
- Popa, C. C., & Muşat, V. (2018). Análisis tridimensional de elementos finitos del comportamiento de cimentación en suelo reforzado con inclusiones rígidas. *Buletinul Institutului Politehnic Din Lasi.Sectia Constructii, Arhitectura*, 64(4), 41-55. Recuperado de <http://aulavirtual.urp.edu.pe/bdacademicas/scholarly-journals/three-dimensional-finite-element-analysis/docview/2216252893/se-2>
- Pradenas, A., Villalobos, F., Villalobos, S. (2017). Predicción del exceso de presión de poros en el estudio de la licuación de la arena bio bío considerando la influencia de la morfología de los granos. Simposio de habilitación profesional. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile. IAHR (ucsc.cl)
- Priebe, H. J. (1995). Design of vibro replacement. Bochum Alemania. Ground Engineering. The Design of Vibro Replacement, Heinz J. Priebe (psu.edu)

- Provincial, O. (2020). *Estudio de la mejora de suelos blandos con inclusiones rígidas*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Sevilla. Estudio de la mejora de suelos blandos con inclusiones rígidas
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T.Z, Nakai, S. & Yamazaki, F. (2015). Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Mega-earthquakes: Application to Lima, Central Perú. Boletín de la Sociedad Sismológica de América. (PDF) Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Mega-earthquakes: Application to Lima, Central Peru (researchgate.net)
- Richards, R., Elms, D. G. & Budhu, M. (1993). Capacidad de carga sísmica y asentamientos de cimentaciones. Revista de la Universidad de Arizona. (PDF) Capacidad de carga sísmica y asentamientos de cimentaciones (researchgate.net)
- Rios, A. J. & Rojas J. (2020). *Mejoramiento de suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, intercambio vial aeropuerto Chincheros – Cusco* (Tesis de Pregrado). Universidad Ricardo Palma. Mejoramiento de suelo en zona susceptible a licuación utilizando inclusiones, intercambio vial aeropuerto Chincheros – Cusco (urp.edu.pe)
- Rosales, C. A. (2021). *Evaluación de conductividad hidráulica y eficiencia drenante en capas granulares para pavimentos articulados permeables* (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Colombia. TG\_40\_507429\_Ariza\_507135\_Velandia\_Documento.pdf (ucatolica.edu.co)
- Saragoni (1993). Coeficientes sísmicos estáticos de diseño para estudios de estabilidad de tranques de relaves para terremotos subductivos intraplaca chilenos. Revista científica de la Universidad de Chile.
- Santos, M. (2005). *Modificación de suelos por el método de vibro sustitución o vibro compactación aplicado en puertos marítimos [Tesis de título profesional, Instituto Tecnológico de la Construcción, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción]*. Repositorio Institucional. [https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/Santos\\_Coy\\_Erechavale ta\\_Mauricio\\_44758.pdf](https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Licenciatura/Santos_Coy_Erechavale ta_Mauricio_44758.pdf)
- Suárez, S. M. & Uribe, A. P. (2020). *Alternativas de solución de mejoramiento del suelo para contrarrestar el efecto de licuación de la base naval del Callao* (Tesis de Pregrado). Universidad Ricardo Palma. Alternativas de solución de mejoramiento

del suelo para contrarrestar el efecto de licuación de la Base Naval del Callao  
(urp.edu.pe)

Tavera, H. (2014). Evaluación del peligro asociado a los sismos y efectos secundarios en  
Perú. Instituto Geológico del Perú. fil20140926131431.pdf (indec.gov.pe)

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Nueva York. John Wiley and Sons. Inc.  
Frontmatter (wordpress.com)

Vesic, A. (1977). Diseño de cimentaciones de pilotes. Washington D.C. Programa  
nacional de investigación cooperativa de carreteras. nchrp\_syn\_42.pdf (trb.org)

Villalaz, C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones. (5ta edición). Grupo Noriega  
Editores. Mecánica de suelos y cimentaciones (wordpress.com)

Yepes, V. (2019). Clasificaciones de las técnicas de mejora y refuerzo del terreno. Boletín  
de la Universidad Politécnica de Valencia. Clasificaciones de las técnicas de  
mejora y refuerzo del terreno – El blog de Víctor Yepes (upv.es)

## ANEXOS

### Anexo 1: Matriz de consistencia

#### TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO EN SUELOS ARENOSOS PARA MITIGAR LOS EFECTOS DE LA LICUEFACCIÓN EN EL DISTRITO DE CHORRILLOS

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>¿Cómo las técnicas de <b>mejoramiento</b> en suelos arenosos ayudan a mitigar los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima año 2022?</p>	<p>Determinar las técnicas de <b>mejoramiento</b> en suelos arenosos para mitigar los efectos de la licuefacción, utilizando métodos numéricos, en el distrito de Chorrillos, Lima año 2022.</p>	<p>Las técnicas de <b>mejoramiento</b> en suelos arenosos mitigan los efectos de la licuefacción en el distrito de Chorrillos, Lima año 2022.</p>	<p><i>VARIABLE INDEPENDIENTE</i></p> <p>Técnicas de <b>mejoramiento</b></p>	<p><i>Columna de grava</i></p> <p><i>Inclusiones rígidas</i></p> <p><i>Jet Grouting</i></p>	<p><b>Investigación</b> <i>Documental/Bibliográfica</i></p> <p><b>Método</b> <i>Deductivo</i></p> <p><b>Orientación</b> <i>Aplicada</i></p> <p><b>Enfoque</b> <i>Cuantitativo</i></p>
PROBLEMA ESPECÍFICO	OBJETIVO ESPECÍFICO	HIPÓTESIS ESPECÍFICO			<p><b>Tipo de investigación</b> <i>Descriptivo, Correlacional y Explicativo</i></p> <p><b>Nivel de investigación</b> <i>Descriptivo</i></p> <p><b>Diseño de la investigación</b> <i>Observacional, Transversal y Retrospectivo</i></p> <p><b>Estudio Del Diseño</b> <i>Cohortes (Causa-Efecto)</i></p>
<p>¿Cómo la técnica de <b>columna de grava</b> ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros y los asentamientos?</p> <p>¿Cómo la técnica de <b>inclusiones rígidas</b> ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos?</p> <p>¿Cómo la técnica de <b>Jet Grouting</b> ayuda a mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos?</p>	<p>Determinar la técnica de <b>columna de grava</b> para mitigar el aumento de la presión de poros y los asentamientos.</p> <p>Determinar la técnica de <b>inclusiones rígidas</b> para mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.</p> <p>Determinar la técnica del <b>Jet Grouting</b> para mitigar el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.</p>	<p>La técnica de <b>columna de grava</b> mitiga el aumento de la presión de poros y los asentamientos.</p> <p>La técnica de <b>inclusiones rígidas</b> mitiga el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.</p> <p>La técnica de <b>Jet Grouting</b> mitiga el aumento de la presión de poros, la baja capacidad portante y los asentamientos.</p>	<p><i>VARIABLE DEPENDIENTE</i></p> <p>Efectos de la licuefacción</p>	<p><i>Aumento de presión de poros</i></p> <p><i>Baja capacidad portante del suelo</i></p> <p><i>Asentamientos</i></p>	

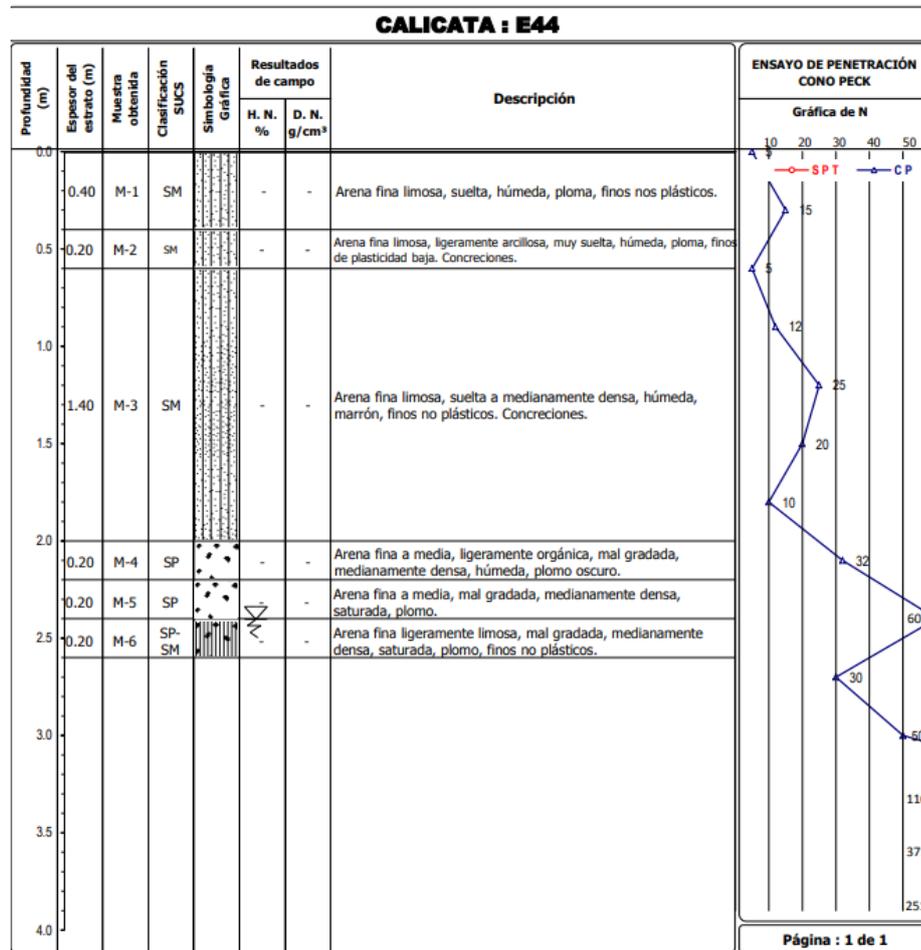
Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 2: Matriz de Operacionalización

Variable dependiente		Variable independiente	
Efectos de la licuefacción		Técnicas de mejoramiento	
Indicadores	Índices	Indicadores	Índice
Aumento de presión de poros	Nivel freático	Columna de grava	Altura de la Columna de grava  Asentamiento
Baja capacidad portante del suelo	Carga actuante de la edificación Carga que soporta la técnica de mejoramiento	Inclusiones rígidas	Capacidad portante Altura de la Inclusión  Asentamiento
Asentamientos en cimentaciones	Suelo blando  Cargas depositadas	Jet Grouting	Capacidad portante Altura del Jet Grouting  Asentamiento

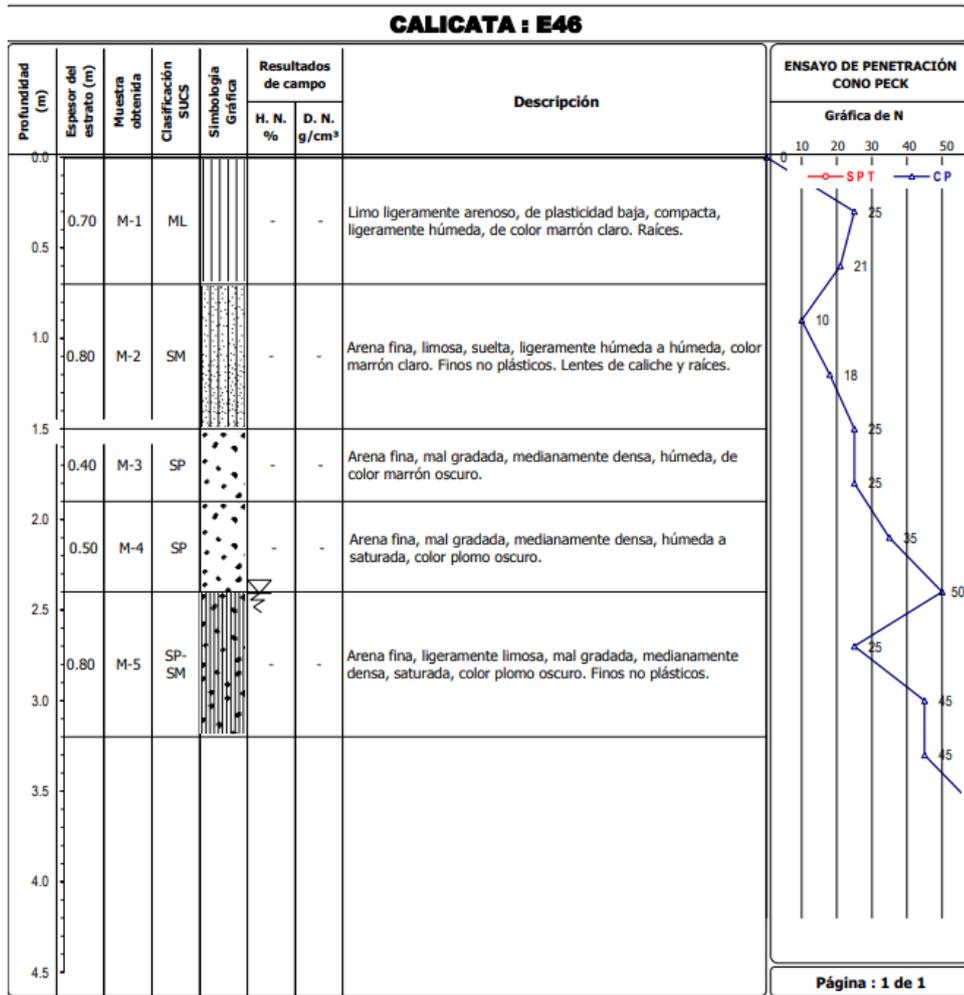
Fuente: Elaboración propia.

### Anexo 3: Calicata E44



Fuente: CISMID (2010).

### Anexo 4: Calicata E46



Fuente: CISMID (2010).

**Anexo 5: Tabla de Pesos Unitarios, Ang. Fricción y Cohesión.**

DESCRIPCIÓN		Peso unitario ( Saturado/ seco)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)
Tipo	Material			
Sin cohesión	Arena suelta, tamaño de grano uniforme	19/14	28-34	
	Arena densa, tamaño de grano uniforme	22/17	32-40	
	Arena suelta, diferentes tamaños de grano	20/16	34-40	
	Arena densa, diferentes tamaños de grano	21/18	38-46	
	grava, tamaño de grano uniforme	22/20	34-37	
	Arena y grava, mezcla de tamaños	19/17	48-45	
	Roca fracturada o volada: Basalto	22/17	40-50	
	Roca fracturada o volada: Granito	20/17	45-50	
	Roca fracturada o volada: Limolita	19/16	35-40	
	Roca fracturada o volada: Arenisca	17/13	35-45	
roca fracturada o volada : Lulitas	20/16	30-35		
Cohesivos	Montmorillonita ( bentonita blanda )	13/6	7-13	10-20
	Arcilla orgánica muy blanda	14/6	12-16	10-30
	Arcilla blanda, ligeramente orgánica.	16/10	22-27	20-50
	Arcilla Glaciar blanda	17/12	27-32	30-70
	Arcilla Glaciar rígida	20/17	30-32	70-150
	Rocas Igneas duras:			
	granito, basalto, porfidos	25 a 30	35-45	35000-55000
	Rocas Metamórficas:			
	cuarcita, neiss, pizarras	25 a 28	30-40	20000-40000
	Rocas Sedimentarias duras:			
	Lomolitas, dolomita, arenisca	23 a 28	34-45	10000-30000
Rocas Sedimentarias blandas:				
arenisca, carbón, lutita.	17 a 23	25-35	1000-20000	

Fuente: Hoek, E. & Bray, J. W. (1991).

**Anexo 6: Tabla de Ángulos de Fricción y Cohesión.**

SUELO		$\phi'$ prm (°)	c' prm (t/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ mín (°)
1	Relleno heterogéneo	14.144	1.9236	26.373
2	Limo arcilloso amarillento	29.485	0.2172	34.454
3	Arena limosa amarillenta	29.234	0.1948	26.724
4	Arena limosa gris verdosa	38.866	0.0000	34.700
5	Limo arenoso carmelito	39.850	0.0000	34.551
6	Limo arenoso habano	28.066	0.1718	22.766
7	Limo arcilloso habano	28.634	0.9344	31.136
8	Arena fina algo limosa	42.014	0.0000	31.832
9	Arena con gravas	38.184	0.0000	34.369
10	Arcilla limosa habana	24.940	0.4592	28.328
14	Arena compacta habana	50.327	0.0000	48.943
Pr	Promedio suelos	34.317	0.3251	33.320

Fuente: Gonzalez, A. J. (1999).

**Anexo 7: Tabla de factores de carga.**

$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_{\gamma}^a$	$\phi'$	$N_c$	$N_q$	$N_{\gamma}^a$
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.1	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1 072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Fuente: Terzaghi, K. (1943).