



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*

## ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Generación de una herramienta informática en el software OpenSees que permita modelar el efecto de licuefacción de suelos en zonas sísmicas.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

**AUTORES:** Collahuazo Balcázar, Arleth Alicia  
Cruz Jiménez, Dixon Rober

**DIRECTOR:** Duque Yaguache, Edwin Patricio, Mgtr.

LOJA – ECUADOR

2017



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2017

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister.

Edwin Patricio Duque Yaguache.

### DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Generación de una herramienta informática en el software OpenSees que permita modelar el efecto de licuefacción de suelos en zonas sísmicas** realizado por Collahuazo Balcázar Arleth Alicia y Cruz Jiménez Dixon Rober, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, diciembre de 2017

f) .....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros **Collahuazo Balcázar Arleth Alicia** y **Cruz Jiménez Dixon Rober**, declaramos ser autores del presente trabajo de titulación: **Generación de una herramienta informática en el software OpenSees que permita modelar el efecto de licuefacción de suelos en zonas sísmicas**, de la Titulación Ingeniería Civil, siendo Edwin Patricio Duque Yaguache, Mgtr. director del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaramos conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. ....  
Autor Collahuazo Balcázar Arleth Alicia  
Cédula 1104673320

f. ....  
Autor Cruz Jiménez Dixon Rober  
Cédula 1106050154

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación quiero dedicárselo a mis padres, Alicia y Ricardo por confiar en mí, por escucharme y acompañarme, por todos los consejos recibidos y las oraciones donde me tuvieron presente, por todo el tiempo y preocupación que me han dedicado para motivarme a cumplir este propósito en mi vida.

Arleth Collahuazo

A mis padres, a mis hermanos, a mis maestros que han sido la guía y que han sido los cimientos para mi formación personal y profesional.

Dixon Cruz

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a Dios, por darme la oportunidad de cumplir este sueño, y permitirme terminar este proyecto, además quiero agradecer a mi madre Alicia, quien ha estado pendiente de mí todo el tiempo, a mi padre Ricardo por el apoyo recibido y su inmenso cariño, a mis hermanos Ricardo y Pablo por todo su amor.

Agradezco al Mgtr. Edwin Duque, quien ha sido guía en esta investigación, por su paciencia y por todos los conocimientos compartidos para poder cumplir con este proyecto.

Además agradezco a Edita, por acogerme con cariño durante mis años de estudio, por su compañía y su preocupación, a Constante, Antonio, Eulalia y Teresa por todo su apoyo y consideración, y en especial quiero agradecer a mi tía Nery, a quien Dios puso en el cielo para guiar mi camino.

Agradezco también a Kevin, Antonella, Karla, Sofía, María Antonia, Andrea y Diana quienes han sido los que me inspiraron a seguir adelante siempre y fueron un gran apoyo durante todo este proceso de estudio.

A Dixon, mi compañero de tesis, a Cindy que ha sido la más genial amiga que he podido encontrar en estos años de estudio, a Leonardo, por ser tan increíble siempre y a todos mis demás familiares, amigos y compañeros que creyeron en mí para llegar a culminar este proyecto.

Arleth Collahuazo

A mi familia por su firme e incondicional apoyo.

Al Mgtr. Edwin Duque por sus conocimientos, esfuerzo y entera disposición brindados para la culminación del presente trabajo.

A los amigos y personas que han permitido y colaborado en la consecución de esta importante meta.

Dixon Cruz

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	5
1.1. Problema.....	6
1.2. Justificación.....	7
1.3. Hipótesis.....	8
1.4. Objetivos. ....	9
1.4.1. Objetivo general. ....	9
1.4.2. Objetivos específicos. ....	9
1.5. Metodología.....	9
1.6. Alcance.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	10
2.1. Teoría de la tectónica de placas. ....	11
2.1.1. Placas tectónicas o placas litosféricas.....	11
2.1.2. Bordes de placas. ....	12
2.2. Generalidades de sismicidad y sismicidad en Ecuador. ....	13
2.2.1. Generación de sismos. ....	13
2.2.2. Magnitud e intensidad de los terremotos. ....	14
2.2.3. Ondas sísmicas.....	16
2.2.4. Sismicidad en Ecuador. ....	19
2.2.5. Fallas geológicas en el Ecuador. ....	20
2.2.6. Historia sísmica del Ecuador.....	21
2.3. Dinámica de suelos y estructuras. ....	24
2.3.1. Naturaleza y tipos de carga dinámica. ....	24
2.3.2. Fundamentos de vibración.....	25

2.3.3.	Parámetros dinámicos del suelo.....	32
2.4.	Fenómeno de licuefacción de suelos.....	36
2.4.1.	Generalidades del fenómeno.....	36
2.4.2.	Caracterización del fenómeno.....	42
2.4.3.	Evaluación del potencial de licuefacción.....	53
2.4.4.	Mitigación del fenómeno de licuefacción.....	69
2.5.	Métodos numéricos y el fenómeno de licuefacción.....	74
2.5.1.	Historia.....	74
2.5.2.	Modelos constitutivos.....	75
2.5.3.	Programas informáticos y los modelos de elementos finitos.....	76
2.5.4.	Software Open-Source: OpenSees.....	77
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		86
3.1.	Implementación de la herramienta informática.....	88
3.1.1.	Descripción del modelo numérico.....	89
3.1.2.	Implementación de las interfaces gráficas.....	97
3.2.	Validación de la herramienta.....	104
3.2.1.	Proceso de validación.....	104
3.3.	Definición de los escenarios para análisis de la licuefacción.....	105
3.3.1.	Variables dependientes.....	105
3.3.2.	Variables independientes.....	113
3.3.3.	Descripción de escenarios y modelos analizados.....	114
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		116
4.1.	Herramienta para evaluación del potencial de licuefacción.....	117
4.1.1.	Herramienta de pre-proceso.....	117
4.1.2.	Herramienta de post-proceso.....	120
4.2.	Resultados del proceso de validación.....	123
4.2.1.	Validación del código generado.....	123
4.2.2.	Validación de la herramienta informática.....	124
4.3.	Modelación numérica de los escenarios establecidos.....	126
4.3.1.	Escenario 1.....	126

4.3.2.	Escenario 2. ....	129
4.3.3.	Escenario 3. ....	131
4.3.4.	Escenario 4. ....	134
4.3.5.	Escenario 5. ....	136
4.3.6.	Escenario 6. ....	138
4.3.7.	Escenario 7. ....	140
4.3.8.	Escenario 8. ....	142
4.3.9.	Escenario 9. ....	144
4.3.10.	Escenario 10. ....	146
4.3.11.	Escenario 11. ....	148
4.3.12.	Escenario 12. ....	150
4.3.13.	Escenario 13. ....	152
4.3.14.	Escenario 14. ....	154
4.3.15.	Porcentajes de reducción de la tensión efectiva inicial y del esfuerzo de corte. 156	
4.4.	Análisis de los resultados de las modelaciones numéricas. ....	157
	CONCLUSIONES. ....	161
	RECOMENDACIONES. ....	163
	BIBLIOGRAFÍA. ....	164
	ANEXOS. ....	171

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mosaico de las placas tectónicas que constituyen la litósfera. Fuente: Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005. Elaboración: Los Autores. ....	12
Figura 2. Zonas de subducción de la Tierra, resaltadas mediante la distribución mundial de epicentros de terremotos de gran magnitud ( $m_b > 4$ ) para el período 1961-67. ....	14
Figura 3. Foco y epicentro de un sismo.....	15
Figura 4. Longitud de onda expresada como $\lambda$ . ....	19
Figura 5. Mapa de Peligro Sísmico de Ecuador. ....	20
Figura 6. Sistemas de fallas activas en Ecuador.....	21
Figura 7. Vibración Libre de masa – resorte.....	26
Figura 8. Visualización del desplazamiento, velocidad y aceleración. ....	27
Figura 9. Sistema de vibración forzada de masa – resorte. ....	28
Figura 10. Variación del factor de aumento, respecto a la relación de frecuencias en vibración forzada no amortiguada.....	29
Figura 11. Sistema de vibración libre de masa – resorte – amortiguador. ....	30
Figura 12. Condiciones de amortiguamiento para vibración libre amortiguada.....	31
Figura 13. Variación del factor de aumento o de amplificación, respecto a la relación de frecuencias en vibración amortiguada. ....	32
Figura 14. Diferentes módulos de corte en la curva de histéresis de un material no lineal...	35
Figura 15. Proceso del fenómeno de licuefacción a) depósito de suelo inalterado; b) efecto de carga sísmica; c) estructura del depósito colapsado; d) depósito de suelo restituído. Fuente: Ter-Martirosyan, Sobolev, & Merkin, 2016. Elaboración: Los Autores. ....	38
Figura 16. Vista aérea de la falla de la presa Fort Peck (Cuerpo de ingenieros del ejército E.U.A.) Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores. ....	43
Figura 17. Perfil de suelo y ensayo de resistencia CPT en Kawagishi-cho – Niigata. Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores. ....	44
Figura 18. Edificio de departamentos en Kawagishi-cho que se inclinó y rotó debido a una falla de cimentación por la licuefacción. Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores. ....	44
Figura 19. Presa de San Fernando. Izquierda: situación de la presa antes de la falla. Derecha: detalle del dique luego de la falla. Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores. ....	45
Figura 20. Deslizamiento de flujo en Abefan luego de la falla. Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores.....	46
Figura 21. Izquierda: tren de vehículos de prospección geotécnica. Derecha: Licuefacción inducida por las placas de vibrosis en arenas saturadas. Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores.....	47

Figura 22. Efecto de la historia sísmica sobre la licuefacción de suelos. Fuente: Mussio, 2012. Elaboración: Los Autores.....	50
Figura 23. Volcán de arena a través de una grieta preexistente. Fuente: Huang & Yu, 2017. Elaboración: Los Autores.....	51
Figura 24. Desplazamiento lateral de terraplén. Capitol Interpretive Center (PEER 2001b). Fuente: Huang & Yu, 2017. Elaboración: Los Autores.....	52
Figura 25. Asentamientos por licuefacción en Niigata – Japón, 1964. Fuente: Mussio, 2012. Elaboración: Los Autores.....	52
Figura 26. Grietas observadas con expulsión de arena. Grecia, 2008. Fuente: Huang & Yu, 2017. Elaboración: Los Autores.....	53
Figura 27. $\sigma_{vd}$ en función de la profundidad según las metodologías de Seed e Idriss (1971). Fuente: Youd T. L. & Idriss I. M., 2001. Elaboración: Los Autores.....	55
Figura 28. Relación entre el número de golpes $N_1$ y la relación de esfuerzos cíclicos para sismos de magnitud 7.5. Fuente: Youd, Idriss & co-autores, 2001. Elaboración: Los Autores. ....	58
Figura 29. Esfuerzos de compresión durante el ensayo triaxial cíclico. Fuente: Rees, 2013. Elaboración: Los Autores.....	62
Figura 30. Ensayo de corte simple cíclico. Fuente: Das & Ramana, 2010. Elaboración: Los Autores. ....	64
Figura 31. Licuefacción inicial con ensayo de corte simple cíclico, arenas de Monterrey (Peakock & Seed 1968). Fuente: Jefferies & Been, 2015. Elaboración: Los Autores. ....	65
Figura 32. Esquema del aparato de columna resonante. Fuente: Das & Ramana, 2010. Elaboración: Los Autores.....	66
Figura 33. Equipo de ensayo mesa vibratoria. Fuente: Pathak et al., 2010. Elaboración: Los Autores. ....	68
Figura 34. Esquema de equipo de centrífuga dinámica. Fuente: Dobry & Liu, 1994. Elaboración: Los Autores.....	69
Figura 35. Proceso de vibro-reemplazamiento de una columna de suelo. Fuente: Idriss & Boulanger, 2008. Elaboración. Los Autores. ....	71
Figura 36. Proceso de compactación dinámica. Fuente: Idriss & Boulanger, 2008. Elaboración. Los Autores.....	71
Figura 37. Inyección de material denso para lograr densificación del suelo. Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014. Elaboración. Los Autores.....	72
Figura 38. Aplicación de Jet Grouting para producir consolidación. Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014. Elaboración. Los Autores. ....	72
Figura 39. Distribución de drenes en un depósito de suelo. Fuente: Idriss & Boulanger, 2008. Elaboración. Los Autores.....	73

Figura 40. Excavación y reemplazo de material susceptible a licuefacción. Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014. Elaboración: Los Autores. ....	73
Figura 41. Esquema de análisis en el software OpenSees. Fuente: Mazzoni et al., 2007. Elaboración: Los Autores. ....	77
Figura 42. Curva esfuerzo – deformación en diversos materiales, en el software OpenSees. Fuente: Mazzoni et al., 2007. Elaboración: Los Autores. ....	81
Figura 43. Series de tiempo relacionados a patrones de carga en el software OpenSees. Fuente: Mazzoni et al., 2007. Elaboración: Los Autores. ....	83
Figura 44. Esquema del Módulo ‘Dominio’. Fuente: Mazzoni et al., 2007. Elaboración: Los Autores. ....	83
Figura 45. Esquema del Módulo Análisis. Fuente: Mazzoni et al., 2007. Elaboración: Los Autores. ....	84
Figura 46. Escenario simulado por el modelo numérico de OpenSees. Fuente: OpenSees, 2011. Elaboración: Los Autores. ....	87
Figura 47. Fases para el desarrollo de la metodología. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	88
Figura 48. Procesos del código generado para simulación de una columna de suelo mediante elementos finitos. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	89
Figura 49. Elemento de mallado Nine Four Node QuadUP. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	90
Figura 50. Parámetros para definir geometría de la columna de suelo. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	91
Figura 51. Secuencia de generación de la columna de suelo. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	92
Figura 52. Curva esfuerzo – deformación del material PressureDepensMultiYield02. Fuente: Yang, 2012. Recuperado de: <a href="https://goo.gl/JUiohb">https://goo.gl/JUiohb</a> . Elaboración: Los Autores. ....	93
Figura 53. Flujograma general de la herramienta de análisis del fenómeno de licuefacción. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	98
Figura 54. Flujograma de la interfaz principal de la herramienta de pre – proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	99
Figura 55. Flujograma de la interfaz secundaria de pre – proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	100
Figura 56. Flujograma de la interfaz de post – proceso: Comparación. ....	102
Figura 57. Flujograma de la interfaz de post – proceso: Licuefacción. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	103
Figura 58. Metodología de validación de herramienta de pre y post-proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	105

Figura 59. Rangos de distribución del tamaño del grano para suelos licuables.....	106
Figura 60. Relación de la velocidad de onda de corte y aceleración máxima para condiciones similares del Imperial Valley, California. ....	109
Figura 61. Tipos de estratificación del suelo para los escenarios empleados en la investigación.....	111
Figura 62. Registro de aceleración en cm/s <sup>2</sup> del Sismo de Pedernales, Ecuador 2016.....	113
Figura 63. Proceso de modelación mediante la herramienta informática. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores.....	117
Figura 64. Interfaz principal de la herramienta de pre – proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores.....	118
Figura 65. Elementos en la barra de menús de la herramienta generada. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores.....	119
Figura 66. Interfaz secundaria de la herramienta de pre – proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores.....	119
Figura 67. Funciones complementarias de la herramienta de pre – proceso. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	120
Figura 68. Interfaz de post – proceso: Comparación. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	121
Figura 69. Interfaz de post – proceso: Licuefacción. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	122
Figura 70. Comparación de los resultados al emplear el código base y el código generado. Fuente: Los Autores. Elaboración: Los Autores. ....	124
Figura 71. Desplazamientos máximos obtenidos para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo. ....	126
Figura 72. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo, para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo.....	127
Figura 73. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo. ....	128
Figura 74. Esquema representativo de las gráficas de desplazamiento y relación de poros de los escenarios de la investigación .....	129
Figura 75. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 2, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno. ....	130
Figura 76. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 2, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.....	130

Figura 77. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 2 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	131
Figura 78. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 3, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna.....	132
Figura 79. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 3, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna. ....	133
Figura 80. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 3 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	134
Figura 81. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 4, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna.....	135
Figura 82. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 4, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna. ....	135
Figura 83. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 4 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	136
Figura 84. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 5, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático de la altura de la columna o en estado seco. ....	137
Figura 85. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 5, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático de la altura de la columna o en estado seco.....	137
Figura 86. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 5, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	138
Figura 87. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 6, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno. ....	139
Figura 88. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 6, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.....	139
Figura 89. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 6, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	140

Figura 90. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 7, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna.....	141
Figura 91. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 7, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna. ....	141
Figura 92. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 7, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	142
Figura 93. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 8, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna.....	143
Figura 94. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 8, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna. ....	143
Figura 95. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 8 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	144
Figura 96. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 9, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno. ....	145
Figura 97. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 9, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.....	145
Figura 98. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 9, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	146
Figura 99. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 10, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno. ....	147
Figura 100. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 10, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.....	147
Figura 101. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 10 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	148
Figura 102. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 11, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna.....	149
Figura 103. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 11, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{4}$ de la altura de la columna. ....	149

Figura 104. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 11 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	150
Figura 105. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 12, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna.....	151
Figura 106. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 12, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna. ....	151
Figura 107. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 12 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	152
Figura 108. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 13, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno. ....	153
Figura 109. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 13, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.....	153
Figura 110. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 13 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	154
Figura 111. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 14, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna.....	155
Figura 112. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 14, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a $\frac{1}{2}$ de la altura de la columna. ....	155
Figura 113. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 14 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo. ....	156

## RESUMEN

La licuefacción de suelos es el fenómeno que produce la reducción de la capacidad de soporte en suelos no cohesivos saturados cuando son sometidos a cargas sísmicas. Debido a la complejidad de su análisis, en esta investigación se ha desarrollado una herramienta informática que permita modelar el efecto de licuefacción de suelos no cohesivos con cargas sísmicas para brindar facilidades en su estudio. La herramienta informática ha sido generada en Matlab y permite realizar el pre y post proceso de un modelo numérico que utiliza el software libre OpenSees como motor de cálculo.

Los resultados obtenidos incluyen la interfaz de pre proceso para el ingreso de la información geométrica y geotécnica de la columna de suelo con la carga sísmica, y la interfaz de post proceso para visualizar la variación de desplazamientos, aceleraciones, esfuerzos axiales, deformaciones y presión de poro de la masa de suelo. Al utilizar la herramienta para modelar 14 escenarios propuestos se ha comprobado que la densidad relativa del suelo y la ubicación del nivel freático son las variables de mayor incidencia en la activación de licuefacción.

**Palabras claves:** Modelación, licuefacción, herramienta informática, elementos finitos, OpenSees.

## **ABSTRACT**

Soil liquefaction is the phenomenon that produces the reduction of the support capacity in saturated non-cohesive soils when subjected to seismic loads. Due to the complexity of its analysis, this research has developed a computing tool that allows modeling the effect of liquefaction of non-cohesive soils with seismic loads to provide facilities in its study. The computer tool has been generated in Matlab and allows the pre and post process of a numerical model which uses the open source OpenSees as a calculation engine.

The results obtained include the pre-process interface for input the geometric and geotechnical information of the soil column with the seismic load, and the post-process interface to visualize the variation of displacements, accelerations, axial stress, deformations and pressure pore of the soil mass. Using the tool to model 14 proposed scenarios has been proven that the relative density of the soil and the location of the groundwater table are the variables with the highest incidence in the activation of liquefaction.

**Keywords:** Modeling, liquefaction, computing tool, finite elements, OpenSees.

## INTRODUCCIÓN

Los eventos sísmicos en la rápida liberación de la energía producen, además de vibraciones, efectos con un elevado potencial de daño, entre ellos el agrietamiento del terreno, tsunamis, inundaciones y efectos geotécnicos. De éstos últimos, se tiene principalmente la licuefacción del suelo (Delgado, 2011).

El fenómeno de licuefacción se produce generalmente en suelos no cohesivos en condiciones saturadas, mediante la reducción de la capacidad de soporte al ser sometidos a una carga sísmica. El suelo inicialmente es una masa con partículas sólidas y espacios intersticiales o poros, durante el sismo los poros se reducen y el agua es expulsada hacia la superficie por la densificación de las partículas constituyentes, esta reacción se debe a los esfuerzos cíclicos generados con la propagación de las ondas S del sismo (Colindres Selva, 1983). Durante la licuefacción se produce un incremento de la presión de poro que iguala la tensión de confinamiento inicial, por lo tanto, la resistencia al corte disminuye de manera significativa y el suelo llega a comportarse como un líquido viscoso (Delgado, 2011).

La ocurrencia de la licuefacción de suelos manifiesta diversos efectos: deslizamientos, flujos, asentamientos de estructuras, volcanes de arenas, etc., evidenciados a lo largo de eventos sísmicos históricos. Uno de los ejemplos más conocidos, y a partir del cual el fenómeno adquirió relevancia investigativa, fue el que ocurrió con el evento sísmico en Niigata – Japón en 1964, donde el suelo presentó todas las condiciones necesarias para que se manifieste el fenómeno de licuefacción (Ishihara & Koga, 1981). Alrededor de esta fecha se presentaron numerosos estudios sobre la licuefacción de suelos, evaluaciones, determinación de factores de seguridad y otras medidas para establecer el riesgo que el fenómeno en estudio produce. La mayoría de medidas obtenidas de estas investigaciones implican correlaciones con ensayos de campo y de laboratorio de forma semi-empírica, que fundamentan sus cálculos en la relación de resistencia cíclica, de acuerdo a las investigaciones de H. B. Seed & Idriss (1971).

El software existente, en su mayoría comercial, para analizar el fenómeno de licuefacción se basan en el método simplificado postulado por H. B. Seed & Idriss (1971). Éstos requieren datos de algunas pruebas de campo (SPT, CPT, CPTU, etc.), y usualmente requieren costosas licencias. No obstante, ciertas comunidades han optado por el desarrollo de software de uso libre y gratuito, entre ellos, OpenSees del instituto PEER, que está orientado a la simulación de sistemas estructurales y geotécnicos sometidos a sismos mediante modelos de elementos finitos. El software se presenta como un recurso abierto para investigadores y estudiantes interesados en esta rama de la ingeniería. Uno de los modelos que proporciona OpenSees en su página oficial permite evaluar el fenómeno de licuefacción de suelos al

aplicarse una carga sísmica, este ha sido considerado como el modelo base para la presente investigación.

Este modelo validado propicia el análisis de los efectos de la licuefacción de suelos por carga sísmica a diferencia de un modelo físico donde la representación del fenómeno se dificulta sea por falta de recursos, tiempo o dinero. Los modelos físicos están limitados a representar el potencial destructivo de la licuefacción; estos no permiten determinar las características de su activación o los cambios producidos a nivel estructural del suelo que ha sido sometido a una carga sísmica, considerándose datos sumamente importantes en el análisis del comportamiento dinámico del suelo.

El objetivo de esta investigación es desarrollar una herramienta de pre y post proceso para el modelo seleccionado que se ejecuta con el software libre OpenSees, a partir del cual se analizará las características propias de fenómeno de licuefacción.

Esta herramienta informática busca brindar facilidades para el análisis del fenómeno de licuefacción en suelos no cohesivos, dado que se presentará como un recurso abierto disponible en el laboratorio virtual de Ingeniería Sísmica de la Universidad Técnica Particular de Loja (<http://www.ingenieriasismica.utpl.edu.ec/>). Con este recurso disponible se facilitará la caracterización de suelos con potencial de licuefacción, se sienta bases para investigaciones que amplíen los resultados obtenidos y para desarrollo de planificaciones de prevención de riesgos mediante la zonificación de áreas con suelos potencialmente licuables, entre otros. Para cumplir con lo propuesto, se ha seguido la siguiente organización en el trabajo de investigación:

En el capítulo uno, se explica los antecedentes del proyecto de investigación, incluyendo el planteamiento del problema y la justificación del trabajo, con los respectivos objetivos propuestos para el desarrollo de la misma y sus limitaciones, luego en el capítulo dos se expone el fundamento teórico que sirvió para desarrollar la investigación además de un estado del arte que explica los acontecimientos más importantes de la licuefacción de suelos, sus características y efectos. En el capítulo tres se presenta la metodología que se siguió para cumplir con los objetivos propuestos del proyecto, la cual se basa en un diseño cuantitativo experimental y de tipo transversal, seguido del capítulo cuatro que expone los resultados y su respectivo análisis para finalmente terminar con el capítulo cinco, donde se presenta las conclusiones de la investigación y sus recomendaciones.

**CAPÍTULO I:**  
**GENERALIDADES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

### 1.1. Problema.

La licuefacción es un fenómeno que provoca la reducción significativa de la resistencia y rigidez de los suelos cuando son afectados por cargas sísmicas que se desarrolla principalmente en suelos saturados no cohesivos.

El terremoto de magnitud 7.5  $M_w$  ocurrido en Niigata – Japón (1964) tuvo consecuencias catastróficas para la ciudad. Se registró daños en vías, puentes y más de 11 000 viviendas. Determinadas zonas exhibieron la formación de volcanes de arena, expulsión de agua desde el interior del suelo, agrietamientos superficiales y deslizamientos, instantes posteriores al sismo. Varias edificaciones presentaron asentamientos diferenciales superiores a 50 cm e inclinaciones severas; el caso más notable es el edificio N° 4 del complejo de departamentos de la prefectura de Niigata que registró una inclinación cercana a 80°. La mayor parte de los daños ocasionados no estuvieron directamente ligados al terremoto sino más bien al elevado potencial de licuefacción presente en los suelos sobre los cuales se fundó la ciudad (Ishihara & Koga, 1981).

En el mismo año la ciudad de Anchorage – Alaska fue afectada por un terremoto de magnitud 9.2  $M_w$  que dejó cuantiosos daños y pérdidas humanas además de evidencias de licuefacción de suelos en diversos puntos. Efectos similares se han observado en los sismos de Loma Prieta (1989), Kobe (1995), Taiwán (1999) y Japón (2011), que certifican el potencial destructivo del fenómeno de licuefacción de suelos y la necesidad de su estudio y caracterización.

América del Sur no ha sido indiferente a este fenómeno. La región andina mantiene una actividad sísmica frecuente, debida a su ubicación en los bordes de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. En esta región se han presentado diversos casos de licuefacción, principalmente en zonas costeras, lechos de ríos, lagos y dunas.

El sismo de Pisco – Perú (2007) causó severos daños en zonas residenciales e industriales construidas sobre suelos arenosos saturados (Gil & Alcayhuamán, 2016). En el terremoto de Maule – Chile (2010) se encontró más de 180 áreas afectadas por la licuefacción, distribuidas en un radio de 950 km; se observó hundimientos y grietas en la zona más alejada del epicentro que corresponde al Lago Llanquihue ubicado a 550 km (González Fuentealba, 2015).

Ecuador es un país con alta vulnerabilidad al fenómeno de licuefacción. En los últimos 100 años se han registrado 11 terremotos de magnitud superior a 6.0  $M_w$  (Rivadeneira et al., 2007). Además, la ausencia de las instituciones rectoras de la construcción en la fiscalización directa de las obras implica que estas no siempre se realizan bajo procedimientos técnicos.

Esta vulnerabilidad se demostró durante el sismo de Pedernales – Manabí (2016) cuando gran parte de la red vial de la provincia afectada sufrió asentamientos excesivos y deslizamientos laterales, la formación de volcanes de arena, grietas y hundimientos de viviendas en diversos sectores de las ciudades de Manta, Jama, Pedernales, Muisne. El sismo de Riobamba (1797) ocasionó deslaves, hundimientos y colapsos afectando en tal medida la infraestructura de la ciudad que se optó por reconstruirla 20 km al noroeste de su ubicación original. Se ha observado evidencias de licuefacción en los sismos de Esmeraldas (1906), Pichincha (1914) y Loja (1970) de acuerdo a Rivadeneira et al. (2007).

La evaluación del fenómeno de licuefacción en suelos resulta una tarea difícil de realizar. Usualmente se emplea ensayos de campo como el SPT, CPT,  $V_s$ , entre otros que obtienen los datos reales de las zonas en estudio; no obstante, en la mayoría de proyectos estos métodos son poco accesibles debido a los altos costos y recursos que implican.

Además, el uso ensayos de laboratorio y modelos físicos a escala como métodos para evaluar el potencial de licuefacción se enfrentan a la complejidad de replicar las condiciones in situ del suelo, tanto en su estratificación, heterogeneidad, confinamiento, saturación, entre otros.

## **1.2. Justificación.**

La licuefacción ha dado evidencia histórica de su potencial destructivo y en consecuencia surge la necesidad de implementar procesos y metodologías que simplifiquen su cálculo, al reducir tiempo, costos y el rango de incertidumbre que conllevan los ensayos de campo o modelos físicos. Los métodos actuales que se presentan para evaluar el fenómeno de licuefacción de suelos se resumen en los métodos empíricos y los numéricos.

Los métodos empíricos tienen su fundamento en comparaciones in situ de las veces donde se ha producido y no se ha producido la licuefacción de suelos. Estos métodos se apoyan en la observación y registro de dichos casos, con concepto de la línea estable y el estado estable de las arenas, que principalmente se utiliza en los ensayos de campo y laboratorio para realizar determinadas correlaciones. Los métodos numéricos a su vez, parten de formulaciones en tensiones totales o tensiones efectivas del suelo, en las que se basan los programas actuales para el análisis de licuefacción (García Núñez, 2007).

Los métodos numéricos van de la mano con el avance científico técnico pues implican una alternativa eficiente para investigar la licuefacción de suelos. La representación física de este fenómeno se dificulta por cuestiones de costos y en sí, desarrollar un modelo físico de una columna de suelo conlleva una cantidad considerable de materiales y recursos. La mayoría de software existente para evaluar la licuefacción de suelos sometidos a cargas sísmicas son una combinación de los métodos numéricos y empíricos, pues parten de los resultados de

ensayos de campo para crear simulaciones de diversos escenarios del suelo. Ellos permiten tener aproximaciones bastante cercanas a la representación de la licuefacción, no obstante, requieren licencias de costos elevados que dificultan llegar a analizar este fenómeno.

Existe una tendencia mundial en cuanto a los recursos abiertos con el fin de difundir conocimientos de forma libre y al alcance de todo estudiante e investigador interesado, en los cuales se tiene al software OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). OpenSees se orienta a la simulación de sistemas estructurales o geotécnicos sometidos a la acción de una carga sísmica mediante elementos finitos, desarrollado por el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER). Este software proporciona en su página oficial varios modelos de elementos finitos, con la característica de permitir de implementar y ampliar aplicaciones desarrolladas por la comunidad investigativa.

Para la presente investigación se ha seleccionado un modelo matemático implementado para el software OpenSees, que reúne mayores facilidades para la representación del fenómeno de licuefacción, así como rapidez del análisis y fiabilidad de la obtención de resultados, además de que este procedimiento puede ser tomado como una aproximación inicial aceptable en el estudio del fenómeno y sumarse a los métodos antes mencionados para desarrollar un criterio más amplio de la licuefacción de suelos.

Dado que el software posee una interfaz poco intuitiva en el ingreso de parámetros de análisis y en el tratamiento de los resultados; en esta investigación se generará una herramienta de pre y post proceso que complemente al motor de análisis (OpenSees), la misma que se implementará en el sitio web del laboratorio virtual de ingeniería sísmica de la Universidad Técnica Particular de Loja (<http://www.ingenieriasismica.utpl.edu.ec/>); se facilita así un recurso abierto a futuros investigadores interesados en ampliar el análisis realizado en la presente investigación y a personas en general que buscan entender lo que es el fenómeno de licuefacción.

### **1.3. Hipótesis.**

La creación de una herramienta informática que facilite la modelación de distintos escenarios con varias condiciones geométricas y mecánicas en los suelos no cohesivos permitirá obtener el potencial de licuefacción de la columna de suelo en base a las deformaciones y la relación de presión de poros que presente el mismo al estar sometido a determinadas cargas sísmicas para corroborar las teorías establecidas sobre la licuefacción de suelos.

## **1.4. Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

- Analizar el fenómeno de licuefacción de suelos mediante la generación de modelos numéricos de distintas configuraciones.

### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Analizar el avance científico técnico del fenómeno licuefacción de suelos.
- Identificar las propiedades de los suelos con potencial presencia del fenómeno licuefacción.
- Generar códigos fuente para implementar una herramienta informática que permita el análisis del fenómeno licuefacción de suelos.

## **1.5. Metodología.**

El proyecto de investigación se basó en una metodología cuantitativa debido a la experimentación numérica que emplea la investigación, de diseño experimental por la variación de forma aleatoria de las variables dependientes correspondientes a las intensidades de la carga sísmica, las propiedades geométricas y geotécnicas del tipo de suelo seleccionado, además del tipo transversal, puesto que se emplea un único registro de aceleraciones durante investigación, este corresponde al evento sísmico de Pedernales ocurrido el día 16 de abril del 2016, al cual se le ha variado su intensidad de acuerdo a la aceleración sísmica.

## **1.6. Alcance.**

Para la presente investigación, dentro del análisis del fenómeno de licuefacción de suelos, a partir de la herramienta generada, se definió un tipo de muestra No Probabilístico Discrecional o Intencional, en la cual se limita a los suelos no cohesivos, en específico a las arenas, con densidades relativas menores al 100% en presencia de diferentes profundidades del nivel freático, dado que existe una evidencia histórica de ser los que presentan un gran potencial de licuefacción particularmente bajo la influencia de carga sísmica, se ha limitado el estudio a suelos ubicados en terreno plano. Se seleccionó como carga sísmica el sismo de Pedernales (2016). Este evento sísmico de mayor relevancia ocurrido recientemente en el país, con determinados potenciales de daño desde muy leve a muy intenso, correspondientes a la escala de Mercalli, con el fin de observar la influencia de esas intensidades sísmicas en la activación del fenómeno de licuefacción.

El alcance de la investigación no limita el uso de la herramienta informática, pues se ha incluido capacidad de analizar diversas configuraciones de columna de suelo no cohesivo con el ingreso de diversas cargas sísmicas de entrada, valores de pendiente menores al ángulo de reposo del suelo y distintas profundidades del nivel freático.

**CAPÍTULO II:  
MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se describe la base teórica en la que se fundamenta la presente investigación, se inicia con la descripción de las placas tectónicas que conforman el manto terrestre y las generalidades de sismicidad para entender las características principales de las cargas sísmicas, las cuales, de acuerdo a esta investigación son el tipo de carga dinámica que produce la licuefacción de suelos, luego se expone los fundamentos de dinámica de suelos y estructuras, con el fin de introducir el suelo como un sistema de masa-resorte-amortiguador en los análisis posteriores que además permitan comprender los modos de vibración, y finalmente se describe el estado del arte de la licuefacción, que además de servir como fundamento teórico para desarrollar la investigación permite cumplir con el objetivo de analizar el avance científico técnico del fenómeno licuefacción de suelos.

## **2.1. Teoría de la tectónica de placas.**

La teoría de la tectónica de placas es el conjunto de fundamentos que describen los movimientos de las placas, así como los cambios continuos en su tamaño y forma, los cuales son responsables de generar los principales rasgos geológicos de la Tierra (Tarbuck & Lutgens, 2005); que se expone en los siguientes apartados.

### **2.1.1. Placas tectónicas o placas litosféricas.**

La litosfera se divide en fragmentos conocidos como placas tectónicas que se mantienen en movimientos continuos, de velocidades muy lentas (en promedio 5 cm anuales) debidos a las corrientes del manto, estos producen cambios en su tamaño y forma. El grosor de las placas dependerá de la ubicación de las mismas, si se ubican en los océanos, el espesor puede variar desde unos pocos kilómetros a 100 kilómetros conforme se acerca a las cuencas oceánicas profundas, en la litosfera continental se puede llegar a grosores que van desde los 100 a 250 kilómetros (Tarbuck & Lutgens, 2005). La litósfera oceánica a pesar de ser relativamente más delgada que la continental presenta mayor densidad.

Existen siete placas tectónicas principales: la Norteamericana, la Sudamericana, la del Pacífico, la Africana, la Euroasiática, la Australiana y la Antártica (Tarbuck & Lutgens, 2005), donde la más grande es la placa del Pacífico (Figura 1).

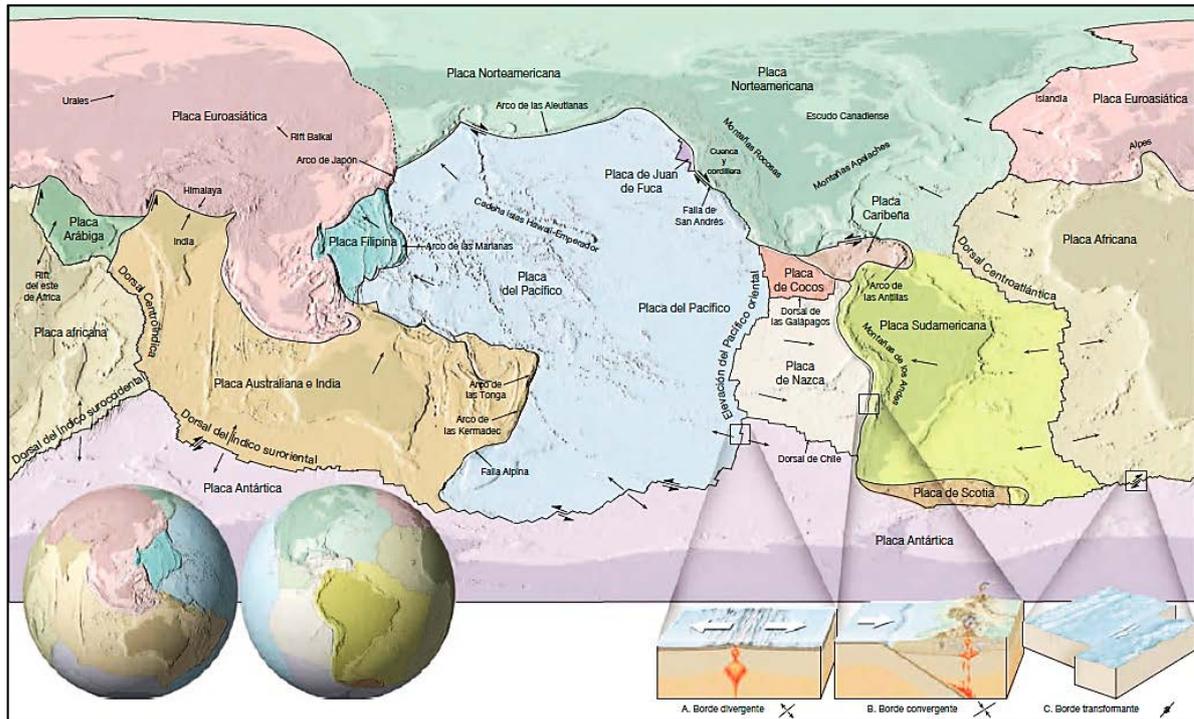


Figura 1. Mosaico de las placas tectónicas que constituyen la litósfera.  
 Fuente: Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005.  
 Elaboración: Los Autores.

### 2.1.2. Bordes de placas.

De acuerdo a la teoría de la tectónica de placas, el movimiento de las mismas se relaciona con las demás, recalando que mayores deformaciones y mayor actividad tectónica se presenta en los bordes de cada placa individual (Tarbuck & Lutgens, 2005). Se distinguen tres tipos de bordes según Kearey et al. (2009):

#### 2.1.2.1. Bordes divergentes.

También conocidos como bordes constructivos o centros de expansión, donde el material que se genera entre las placas de separación, da lugar a nueva litósfera. Las crestas oceánicas delimitan los bordes donde las placas son divergentes.

#### 2.1.2.2. Bordes convergentes.

Son denominados como bordes destructivos, y es donde dos placas convergen o chocan por el mecanismo de la litosfera oceánica de una de las placas, la cual se empuja debajo de la otra a una tasa virtualmente similar a la tasa de creación en las crestas oceánicas. De este tipo de borde se distinguen tres zonas, de acuerdo a Tarbuck & Lutgens (2005).

##### 2.1.2.2.1. Zona de convergencia Océano – Continente.

En este tipo de convergencia la placa oceánica desciende hacia el manto en un proceso de subducción mientras la continental, de menor densidad se mantiene “a flote”. De esta convergencia se origina la formación de un arco volcánico continental y es el que existe en América del Sur, en la costa del Pacífico.

#### 2.1.2.2.2. *Zona de convergencia Océano – Océano.*

El proceso es muy similar al que ocurre en la convergencia océano – continente, pero de él resulta un arco de islas volcánicas. Ejemplos de este tipo de convergencia son los archipiélagos de las Aleutianas, las islas Marianas, que se ubican al noroeste y norte del océano Pacífico respectivamente.

#### 2.1.2.2.3. *Zona de convergencia Continente – Continente.*

Cuando dos placas continentales convergen durante el proceso de subducción de una placa respecto a la otra, la alta capacidad de flotación de ambas origina una colisión continental, con el resultado de la formación de una cordillera o cadena montañosa, como la del Himalaya o la de los Andes.

#### 2.1.2.3. **Bordes de falla transformante.**

Son bordes de placas conservadoras, por el movimiento de forma tangencial que experimentan las dos placas adyacentes, generalmente es paralelo a la falla sin que exista producción o destrucción de las placas.

### 2.2. **Generalidades de sismicidad y sismicidad en Ecuador.**

Las principales sollicitaciones dinámicas a las que un suelo se ve sometido, así como los sistemas estructurales, son las cargas sísmicas y este tipo de carga es el que generalmente llega a producir el fenómeno de licuefacción de suelos. Para introducir el tema de la licuefacción de suelos debida a cargas sísmicas, previamente se describe determinadas generalidades de sismicidad, en las que se incluye temas que resumen las zonas de subducción más grandes de la Tierra donde se registra la mayor actividad sísmica del mundo, los tipos de ondas sísmicas y los sistemas de escalas que permiten cuantificar los eventos sísmicos; además, se describe la actividad sísmica registrada en el Ecuador con un catálogo de sismos donde se resalta los eventos que se observó licuefacción de suelos.

#### 2.2.1. **Generación de sismos.**

Los eventos sísmicos pueden generarse en cualquier lugar y a cualquier hora, no obstante, se ha demostrado que con el pasar de los años siguen un patrón, principalmente en tres grandes zonas de la Tierra. La localización de los sismos no se da de manera aleatoria sino particularmente en las zonas de subducción de los bordes de las placas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

La zona de subducción más grande de la Tierra se conoce como Cinturón de Fuego del Pacífico (Figura 2) que se encuentra a lo largo de la Costa del Océano Pacífico y en él ocurren al menos el 90% de la actividad sísmica mundial de acuerdo al USGS (United States Geological Survey, s.f.). La segunda zona más importante de actividad sísmica es el Cinturón

Alpino o Cinturón de Alpide ubicado al sur de Eurasia, comprende la Cordillera del Himalaya, el mar Mediterráneo hasta llegar al Océano Atlántico, donde ocurre del 5% al 6% de la actividad sísmica mundial (USGS, s.f.). El tercer cinturón es la Cordillera del Atlántico o Dorsal Mesoatlántica, que se encuentra sumergida en medio del océano Atlántico (Tarbuck & Lutgens, 2005).

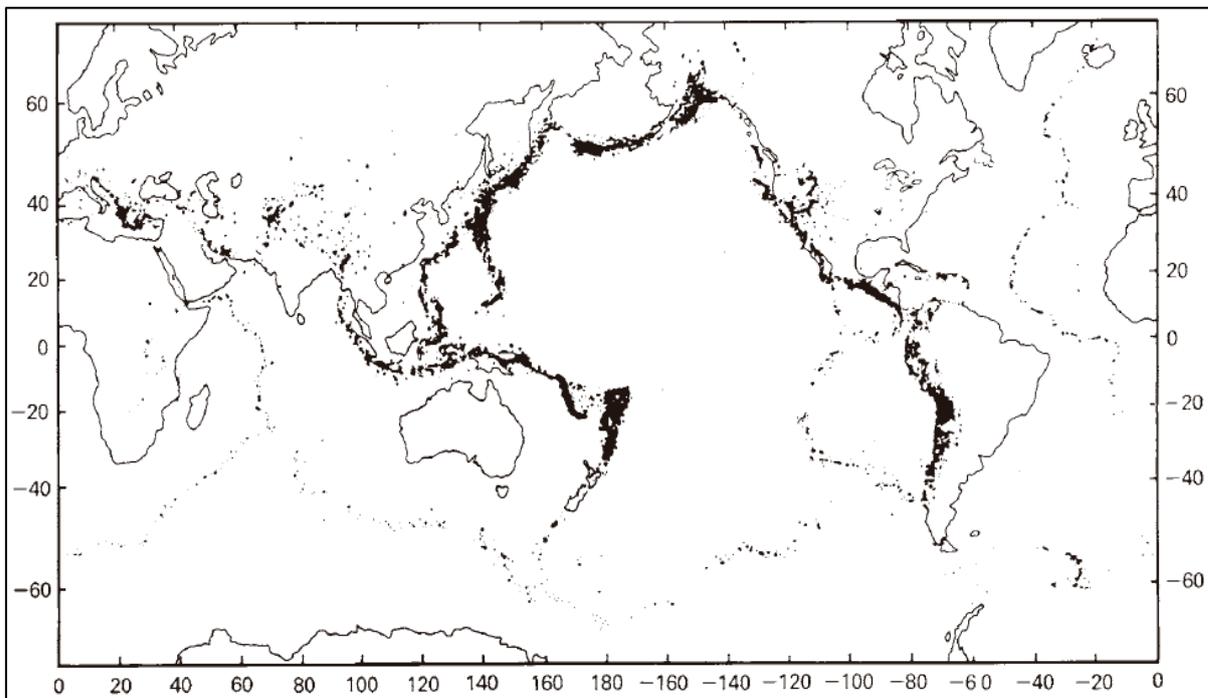


Figura 2. Zonas de subducción de la Tierra, resaltadas mediante la distribución mundial de epicentros de terremotos de gran magnitud ( $mb > 4$ ) para el período 1961-67.

Fuente: Kearey, Klepeis, & Vine, 2008.

Elaboración: Los Autores.

### 2.2.2. Magnitud e intensidad de los terremotos.

Un sismo o “terremoto es la vibración de la Tierra producida por una rápida liberación de energía” de acuerdo a Tarbuck & Lutgens (2005). Los movimientos bruscos que producen los terremotos se dan a lo largo de un plano de falla o zonas de fragilidad de la litósfera que son generalmente en los bordes de las mismas. La energía se libera en todas las direcciones mediante ondas desde el origen, también denominado como foco o hipocentro. El punto que se ubica en la superficie terrestre sobre el centro o foco del sismo se conoce como epicentro, tal y como se muestra en la Figura 3.

De acuerdo a la ubicación de la distancia focal, los sismos se clasifican como superficiales (0-70 km), intermedios (70km – 300km) y profundos (más de 300km) (Kearey et al., 2009).

Los eventos sísmicos son sumamente destructivos cuando son superficiales y más aún si se generan cerca de una población (Tarbuck & Lutgens, 2005), entre los efectos que desencadena un sismo se encuentran los agrietamientos y fracturas del terreno, la

licuefacción del suelo, movimientos de laderas, inundaciones, tsunamis, entre otros (Delgado, 2011).

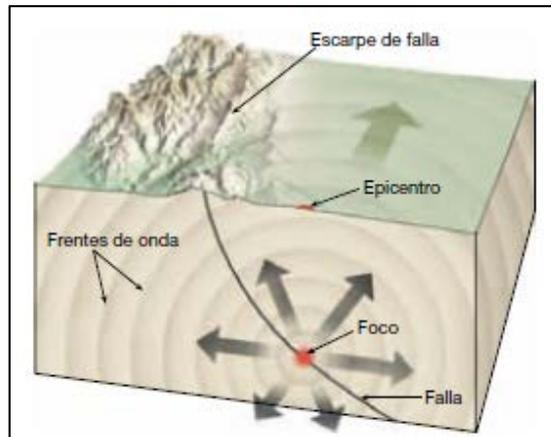


Figura 3. Foco y epicentro de un sismo.  
Fuente: Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005.  
Elaboración: Los Autores.

### **2.2.2.1. Escalas de magnitud.**

La magnitud de un sismo cuantifica la energía liberada en la fuente del mismo, y se determina con registros sísmicos (Tarbuck & Lutgens, 2005). Como las escalas de intensidad únicamente servían de forma local, se buscó la manera de comparar los sismos con la consideración de parámetros similares en todo el mundo, mediante las escalas de magnitud. La escala más conocida es la de Richter, que mide la amplitud o máximo desplazamiento de la mayor onda sísmica registrada en un sismógrafo normalizado. Cada unidad de magnitud de Richter significaría alrededor de 30 veces un aumento de energía, dado que es una escala logarítmica (Kearey et al., 2009). Con el tiempo se ha ido mejorando esta escala y adaptándola para los tipos de ondas sísmicas que existen y las dimensiones de un terremoto, de acuerdo a Tarbuck & Lutgens (2005) se describen a continuación.

#### **2.2.2.1.1. Magnitud original de Richter (ML).**

Para determinar la dimensión de un sismo de foco poco profundo y que se genera a distancias cercanas a una estación con un sismógrafo particular.

#### **2.2.2.1.2. Magnitud de onda superficial (MS).**

En un periodo aproximado de 20 segundos mide la amplitud de la mayor onda superficial.

#### **2.2.2.1.3. Magnitud de onda del cuerpo (mb).**

Para cuantificar un sismo producido a una gran profundidad focal que además se generan a grandes distancias de la estación de control.

#### 2.2.2.1.4. Magnitud del momento (MW).

Para cuantificar un sismo considerado mediano a muy grande, o incluso los sismos de periodos muy largos mediante el desplazamiento medido a lo largo de la falla, el área de la superficie de falla y la resistencia al corte de la roca fallada.

#### 2.2.2.2. Escalas de intensidad.

La intensidad cuantifica el grado del sismo ocurrido en un punto determinado justificado en la cantidad de daños producidos. Existe una escala relativamente fiable que se desarrolló para calcular la intensidad de un sismo mediante la cuantificación de los daños que se han producido a los edificios, de forma local, se conoce como Escala de Intensidad Modificada de Mercalli (Tabla 1), en honor a Giuseppe Mercalli que fue quien la desarrolló, sin embargo la teoría utilizada de la destrucción estructural que producen los sismos no se considera una medida válida para cuantificar realmente un terremoto (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### 2.2.2.2.1. Aceleración máxima (PGA).

Es la medida de las aceleraciones en unidades de Galileo - Gal ( $\text{cm/s}^2$ ) o en la fuerza de la gravedad, g ( $9.81 \text{ m/s}^2$  o 980 Gal) (World Nuclear Association, 2016), que experimentan las partículas del suelo durante un evento sísmico (USGS, s.f.). Se considera que es una medida de intensidad sísmica, la cual se relaciona de forma fácil con la escala de Mercalli. La aceleración del suelo varía de forma decreciente conforme aumenta la distancia desde el epicentro del sismo y es una medida utilizada en normativas y cálculos dentro de la rama de Ingeniería Civil (Universidad de Costa Rica, s.f.).

Tabla 1. Aceleración Sísmica, velocidad sísmica, percepción del temblor y potencial de daño de acuerdo a la escala de Mercalli.

Escala de Mercalli	Aceleración Sísmica (g)	Velocidad Sísmica (cm/s)	Percepción del temblor	Potencial de daño
I	< 0.0017	< 0.1	No apreciable	Ninguno
II - III	0.0017 - 0.014	0.1 - 1.1	Muy leve	Ninguno
IV	0.014 - 0.039	1.1 - 3.4	Leve	Ninguno
V	0.039 - 0.092	3.4 - 8.1	Moderado	Muy leve
VI	0.092 - 0.18	8.1 - 16	Fuerte	Leve
VII	0.18 - 0.34	16 - 31	Muy fuerte	Moderado
VIII	0.34 - 0.65	31 - 60	Severo	Moderado a fuerte
IX	0.65 - 1.24	60 - 116	Violento	Fuerte
X+	> 1.24	> 116	Extremo	Muy fuerte

Fuente: Wikipedia, 2014. Recuperado de: <https://goo.gl/46k7Bq>.

Elaboración: Los Autores.

#### 2.2.3. Ondas sísmicas.

Los instrumentos sísmicos que se emplean para realizar los registros de terremotos se denominan sismógrafos y se diseñan con la resistencia adecuada para soportar las

vibraciones que el sismo pueda producir. Los sismogramas, que son el resultado del registro de un sismo, permiten observar el comportamiento de las ondas sísmicas. La energía elástica que se libera del origen un terremoto, se propaga a través de la Tierra por varios tipos de ondas sísmicas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### **2.2.3.1. Ondas de cuerpo.**

Las ondas que se propagan en el interior de la Tierra como consecuencia de la energía liberada por un sismo, se denominan Ondas de Cuerpo y se dividen en dos tipos, de acuerdo a Kearey et al. (2009), los cuales corresponden a las dos formas de deformar un medio sólido o material y éstas son Ondas Primarias o P y Ondas Secundarias o S.

- Las ondas P son ondas longitudinales o de compresión, pues presentan una deformación elástica que empuja (comprime) y dilata (expande) el material rocoso en la dirección del desplazamiento de la onda, dicho de otra forma, alteran el volumen del medio transmisor. La velocidad de una onda P, se da por:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde  $k$  es el módulo de masa,  $G$  es el módulo de corte y  $\rho$  es la densidad del medio transmisor.

- Las ondas S en cambio son ondas transversales o de corte, pues producen la oscilación de las partículas del medio en ángulo recto con respecto a la dirección de propagación de las ondas y provocan un cambio en la forma del material por el que viajan. La velocidad de una onda S, se da por:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{Ec.2})$$

La velocidad de las ondas P es alrededor de 1,7 veces más rápida que la velocidad de las ondas S en un mismo medio, por lo que se considera que las ondas P llegan antes que las ondas S. Esta simbología da la derivación de ondas P o primarias y ondas secundarias o S (Kearey et al., 2009). Mientras mayor rigidez presenten los materiales, mayores velocidades tendrán las ondas de corte y compresión, sin embargo, en el caso de tener un material compuesto por suelo saturado, las ondas S no se transmiten en el agua contenida en los poros debido a que la rigidez de los fluidos es cero. La onda de corte en el suelo saturado dependerá únicamente de las propiedades de las partículas sólidas de la masa de suelo (Das & Ramana, 2010).

En la norma ecuatoriana de la construcción, en la sección de cargas sísmicas, se definen seis tipos de perfil de suelo de acuerdo a la velocidad de onda de corte (Tabla 2).

Tabla 2. Perfiles de suelo de acuerdo a la velocidad de onda de corte.

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500$ m/s $\geq V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760$ m/s $\geq V_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$N \geq 50$ $S_u \geq 100$ kPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360$ m/s $\geq V_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 \geq N \geq 15$ $100$ kPa $\geq S_u \geq 50$ kPa
E	Perfil que cumpla con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180$ m/s
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3m de arcillas blandas	$IP > 20$ $W \geq 40$ % $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases:	
	F1 - Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc.	
	F2 - Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas)	
	F3 - Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5m con índice de Plasticidad IP > 75)	
	F4 - Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m)	
	F5 - Suelos con contrastes de impedancia a ocurriendo dentro de los primeros 30m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.	
F6 - Rellenos colocados sin control ingenieril		

Fuente: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda - Ecuador, 2014.

Elaboración: Los Autores.

### 2.2.3.2. Ondas superficiales.

Son las ondas sísmicas que se propagan con una proximidad a la superficie de la Tierra, y tienen periodos más largos por lo que también se denominan Ondas Largas o L. Las ondas superficiales pueden ser Ondas Rayleigh y Ondas Love, según Kearey et al. (2009).

#### 2.2.3.2.1. Las ondas Rayleigh.

Provocan que las partículas por el medio en el que viajan formen una elipse en un plano vertical de la dirección de propagación de la onda.

#### 2.2.3.2.2. Las ondas Love.

Son ondas de corte polarizadas horizontalmente, que se propagan por reflexión múltiple con baja velocidad. Se producen cuando la velocidad de las ondas S en la superficie es menor a la capa subyacente.

Las ondas de cuerpo se diferencian de las ondas superficiales principalmente porque éstas últimas son dispersivas, debido a que sus componentes de longitud de onda (Figura 4) viajan a velocidades diferentes. Esta dispersión ocurre por la estratificación de la velocidad en el interior de la Tierra, pues la profundidad de penetración de las ondas depende de la longitud de las mismas, mientras mayor sea la longitud de onda, profundidades mayores alcanzará la onda (Kearey et al., 2009). Entre tanto, se puede definir a longitud de onda como la “distancia horizontal que separa crestas sucesivas” de acuerdo con Tarbuck & Lutgens (2005).

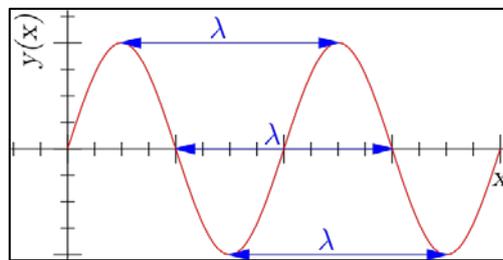


Figura 4. Longitud de onda expresada como lambda.

Fuente: Wikipedia, s.f. Recuperado de: <https://goo.gl/fUdWGA>.  
Elaboración: Los Autores.

#### 2.2.4. Sismicidad en Ecuador.

El Ecuador se ubica en la costa noroccidental de Suramérica, forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, donde la Placa Nazca presenta procesos de subducción bajo la placa Sudamericana, con dirección aproximada Este – Oeste a una velocidad de 60 mm/año (Rivadeneira et al., 2007).

Los procesos de subducción generados entre la Placa Sudamericana y la Placa Nazca son responsables de la alta actividad sísmica del país especialmente en la zona costera y zonas tectónicamente activas en el interior del territorio continental de nuestro país. De acuerdo al grado de sismicidad se ha clasificado desde muy alto en la zona costera más cercana a la fosa oceánica, a medio-alto grado de sismicidad en la región del golfo y sierra norte, hasta finalmente medio a bajo en la sierra sur y región amazónica (Castillo Jaramillo, 2013). El grado de sismicidad en el territorio continental ecuatoriano se ve mejor representado en la siguiente figura, de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción - 2011.

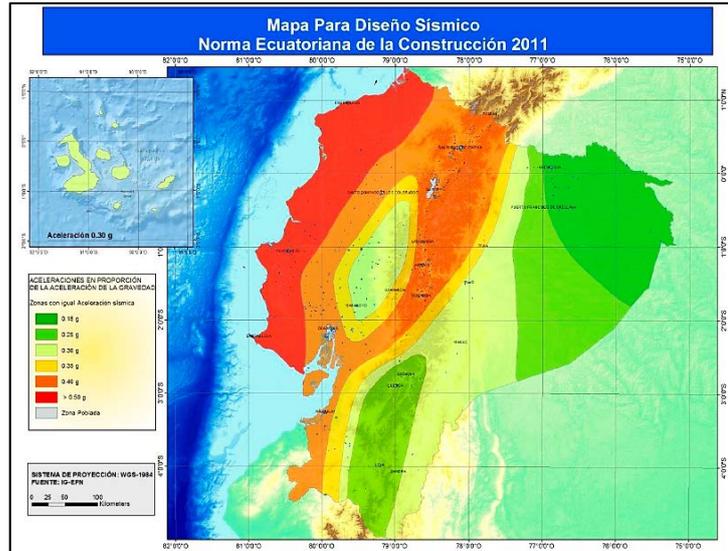


Figura 5. Mapa de Peligro Sísmico de Ecuador.  
Fuente: NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, 2011.  
Elaboración: Los Autores.

### 2.2.5. Fallas geológicas en el Ecuador.

La interacción de las placas Nazca y Sudamericana produce fuerzas de grandes magnitudes en los bordes de las mismas, lo que provoca fracturas en el interior de ellas, este mecanismo de fractura se conoce como falla geológica (Rivadeneira et al., 2007).

Su identificación se realiza agrupando sistemas de falla que se caracterizan por la geometría, extensión y tipo de movimiento, con el fin de determinar los tipos de falla que constituyen una amenaza en el país (Rivadeneira et al., 2007).

El sistema de fallas con mayor longitud del país, de acuerdo a Rivadeneira et al., (2007) es el Subandino, con una longitud de aproximadamente 200 km en dirección casi Norte – Sur, ubicado al costado oriental de la Cordillera Real, donde el principal sistema de fallas activo de nuestro país es el Pallatanga – Chingual, que inicia el Golfo de Guayaquil, pasa por la Isla Puná, el sector de La Toncal, llega a la cordillera por Bucay y continúa por Pallatanga, luego su trazo no es muy claro por la cantidad de material volcánico, se interna en el Callejón Interandino hasta empatarse con la falla de Chingual, que si inicial al norte del volcán Cayambe. En la Figura 6 se muestra un mapa que describe los sistemas de fallas en el Ecuador.

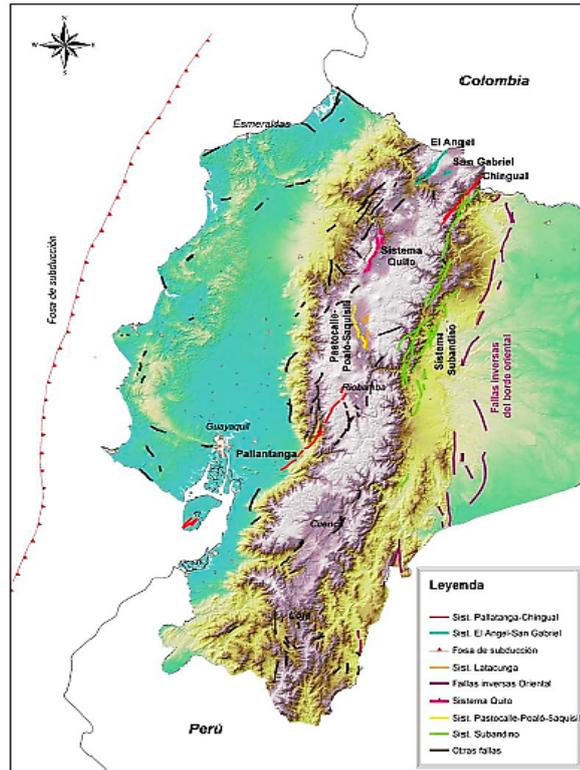


Figura 6. Sistemas de fallas activas en Ecuador.  
Fuente: Rivadeneira, et al, 2007.  
Elaboración: Los Autores.

### 2.2.6. Historia sísmica del Ecuador.

De acuerdo al Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN), se presenta en la Tabla 3 el registro de sismos históricos nacionales, en un periodo de 429 años aproximadamente, con daños iguales o mayores a VIII en la escala de Mercalli.

Tabla 3. Catálogo de terremotos del Ecuador desde el año 1587 al 2016.

Fecha			Int. Máxima	Zona de mayor afectación	Reseña
Año	Mes	Día			
1587	08	31	VIII	Pichincha	Gran destrucción en San Antonio de Pichincha y pueblos aledaños. Producción de Grietas en Guayllabamba, desplome de casas en Cayambe, desbordamiento del lago San Pablo.
1645	03	15	IX	Chimborazo, Tungurahua	Desprendimientos internos en el volcán de Tungurahua.
1675	08	29	IX	Chimborazo, Bolívar	Destrucción en el pueblo de Chimbo y 8 pueblos circundantes, deslizamientos en montes y laderas, agrietamiento del terreno.
1687	11	22	VIII	Tungurahua	Gran destrucción de la ciudad de Ambato, Latacunga y otras poblaciones. Deslizamiento de montes y taludes

1698	-	06	-	20	X	Tungurahua, Chimborazo	Los daños materiales se extendieron desde el Nudo de Tiopullo hasta el Nudo del Azuay. Gran cantidad de muertes. Grandes deslizamientos en montes, laderas y taludes; represamientos de cauces de agua; desbordamiento y avalancha del río Ambato.
1736	-	12	-	06	VIII	Pichincha, Cotopaxi	Daños graves en casas e iglesias de Pujilí, Saquisilí y pueblos aledaños. Afectación de haciendas. Estragos menores en Latacunga
1757	-	02	-	22	IX	Cotopaxi, Tungurahua	Destrucción de iglesias y casas en la ciudad de Latacunga. Efectos considerables en Tungurahua.
1786	-	05	-	10	VIII	Chimborazo	Graves daños en Riobamba y pueblos vecinos. Destrucción total de muchas casas hechas de adobe.
1797	-	02	-	04	XI	Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar	Se considera el sismo más destructivo en el territorio ecuatoriano. Destrucción total de la Villa de Riobamba, <b>licuefacción del suelo</b> , inmensos deslizamientos de laderas y montes, uno de ellos sepultó por completo tres barrios de Riobamba. La ciudad de Riobamba no se reconstruyó en el lugar donde ocurrió este evento sino que se mudó al sitio que ocupa actualmente.
1834	-	01	-	20	XI	Carchi, Nariño* (Colombia)	En Ecuador se reconoció efectos severos en Tulcán e Ibarra, pero en Colombia las consecuencias fueron catastróficas, con el grado de intensidad que alcanzó el sismo, poblaciones fueron prácticamente arrasadas.
1859	-	03	-	22	VIII	Pichincha, Imbabura, Cotopaxi	Graves daños en edificios, iglesias y casa de Quito, haciendas del valle de Los Chillo. Los efectos se extendieron hasta Cotopaxi y e Imbabura.
1868	-	08	-	15	VIII	Carchi	Grandes daños en casas e iglesias en la provincia del Carchi, los estragos aumentaron con el terremoto de Imbabura que se produjo horas más tarde.
1868	-	08	-	16	IX	Imbabura, Carchi, Pichincha	Ruina casi total de ciudades y pueblos. Voluminosos deslizamientos de tierra, derrumbes, grietas y destrucción de vías de comunicación. Se decidió mudar la ciudad de Ibarra por la inmensa cantidad de estragos producidos, sin embargo tiempo más tarde retornaron a reconstruir la ciudad en el mismo lugar.
1896	-	05	-	03	IX	Manabí	Gran destrucción de construcciones en Bahía de Caráquez, Portoviejo y Canoa. <b>Licuefacción</b> de suelos, múltiples deslizamientos de laderas y taludes.

1906 - 01 - 31	IX	Esmeraldas, Nariño (Colombia)	Gran terremoto con epicentro en el Océano Pacífico que generó un tsunami de grandes proporciones. Este es el quinto más fuerte que se ha registrado en el mundo, desde que existen los sismógrafos con magnitud 8.8 Mw. Grandes grietas producidas y <b>licuefacción de suelos</b> . El volcán Cumbal de Nariño "entró en agitación", según lo afirmaron testigos presenciales.
1911 - 09 - 23	VIII	Chimborazo, Bolívar	Sismo violento que causó que el 90% de edificios y casas se afectaran en mayor o menor cuantía en la provincia de Chimborazo. Deslizamiento de laderas y taludes de caminos.
1913 - 02 - 23	VIII	Loja, Azuay	Dstrucción total de algunas viviendas en poblaciones de las provincias de Loja, El Oro y Azuay. Daños graves en muchas casas de la misma zona y en poblaciones del Guayas.
1914 - 05 - 31	VIII	Pichincha, Cotopaxi	En el monte Pullurima y en los alrededores del volcán Antisana hubo eyecciones de lodo, arena y agua ( <b>licuefacciones</b> ) provenientes de cratercitos o grietas formadas a causa del sismo. Ruidos subterráneos. Deslizamientos de cerros.
1923 - 12 - 16	VIII	Carchi, Nariño (Colombia)	Graves daños en edificios públicos, escuelas, viviendas. Deslizamientos en montes, laderas y taludes, caminos inhabilitados. Generación de grietas.
1926 - 12 - 18	VIII	Carchi	Terremoto en la frontera Ecuador-Colombia, que nuevamente asoló las poblaciones que resultaron afectadas con el terremoto de 1923. Incrementó la actividad del volcán Galeras y entra en actividad el volcán Cumbal. Se sugirió reubicar la ciudad de Tulcán.
1929 - 07 - 25	VIII	Pichincha	Daños graves en casas de cal y ladrillo, destrucción total o parcial de casas de sectores rurales de Pichincha
1938 - 08 - 10	VIII	Pichincha	Daños severos en casas de ladrillo y destrucción total de casas de adobe. Grietas en el terreno, ruidos subterráneos y deslizamientos en cerros y taludes.
1942 - 05 - 14	IX	Manabí, Guayas, Bolívar	Dstrucción de edificios y viviendas en la Costa. Cuarteamientos serios en paredes y cubiertas. Grietas en el terreno.
1949 - 08 - 05	X	Tungurahua, Chimborazo, Cotopaxi	Dstrucción total de Pelileo. Grandes grietas en el terreno y derrumbes y deslizamientos voluminosos en montes y caminos de toda la región. <b>Licuefacción</b> de suelo. Modificación del paisaje, aumento de caudales en fuentes termales.

1953 - 12 - 12	VIII	Loja, norte del Perú	Daños en la ciudad de Gonzanamá
1955 - 07 - 20	VIII	Pichincha, Imbabura	Dstrucción total de viviendas rurales. Asentamientos diferenciales serios en edificaciones. Deslizamientos de cerros y taludes. Represamiento del río Blanco.
1958 - 01 - 19	VIII	Esmeraldas, Nariño (Colombia)	Colapso total de casas antiguas y colapso parcial de construcciones nuevas y edificios. Asentamientos diferenciales en edificios, grietas, derrumbes y deslizamientos. Tsunami que arrasa con 4 cuadras de la ciudad de Esmeraldas.
1964 - 05 - 19	VIII	Manabí	Poblaciones afectadas
1970 - 12 - 10	IX	Loja, El Oro, Azuay, norte del Perú	Varias cabeceras cantonales y parroquias de Loja quedaron destruidas casi completamente. Cayeron casas y templos hasta los cimientos. Edificios de buena calidad semidestruidos o seriamente afectados. Grietas y deslizamientos. <b>Licuefacción</b> en menor potencial.
1987 - 03 - 06	IX	Napo, Sucumbíos, Imbabura	Dstrucción de varios tramos del oleoducto Trans-Ecuatoriano. Colapso total de casas del sector rural. Deslizamientos de tierra.
1995 - 10 - 02	VIII	Morona Santiago	Daños considerables en los pueblos aledaños. Colapso del puente del río Upano en Macas. Deslizamiento de tierras.
1998 - 08 - 04	VIII	Manabí	Dstrucción de edificios, daños graves en localidades cercanas.
2016 - 04 - 16	IX	Esmeraldas, Manabí	Dstrucción de edificios, desplazamientos laterales, desplome de muros de contención, movimientos en masa del suelo, <b>licuefacción</b> de suelo.

Fuente: Rivadeneira et al., 2007; Secretaría de Gestión de Riesgos, 2016.

Elaboración: Los Autores.

### 2.3. Dinámica de suelos y estructuras.

Se menciona a continuación de forma breve los fundamentos de la dinámica de suelos y estructuras, donde se incluye una descripción de la naturaleza y tipos de cargas dinámicas, los fundamentos de vibraciones y los parámetros dinámicos del suelo, que sirven de base teórica en la presente investigación para entender el comportamiento del suelo frente a la aplicación de una carga dinámica.

#### 2.3.1. Naturaleza y tipos de carga dinámica.

Las cargas dinámicas varían respecto al tiempo en los parámetros de magnitud, dirección o posición y dependen de la naturaleza de su origen. Se tiene algunos tipos de cargas dinámicas que se mencionará a continuación, las cuales pueden producirse solas o en combinación de varios tipos (Das & Ramana, 2010).

### **2.3.1.1. Cargas periódicas y no periódicas.**

Una carga periódica es aquella que varía en magnitud con el tiempo y los intervalos del periodo se repiten a intervalos regulares de forma indefinida (Chopra, 2014), por ejemplo el funcionamiento de una máquina alternativa o rotativa (Hurtado Gómez, 2000). Las cargas no periódicas en cambio no presentan esa periodicidad, como las cargas de viento en estructuras (Das & Ramana, 2010) y bajo ciertas condiciones las fuerzas de la hélice de un barco, el oleaje en una plataforma marina serían casi periódicas (Chopra, 2014).

### **2.3.1.2. Cargas deterministas y no deterministas.**

Las cargas determinísticas o cargas armónicas son cargas que se las puede definir como una función de tiempo, sin importar si el intervalo de tiempo es regular o irregular, como las cargas dadas por la rotación de una masa excéntrica (Hurtado Gómez, 2000). La comprensión de la respuesta a las cargas armónicas permite entender a las respuestas del sistema ante otros tipos de fuerzas (Chopra, 2014). Las cargas no deterministas no pueden ser definidas como funciones de tiempo por la incertidumbre de la magnitud y la variación respecto al mismo, por ejemplo, las cargas sísmicas (Das & Ramana, 2010).

### **2.3.1.3. Cargas cíclicas.**

Este tipo de cargas tienen cierta regularidad tanto en su magnitud como en su frecuencia (Das & Ramana, 2010).

### **2.3.1.4. Cargas estáticas.**

Se considera como cargas estáticas o cargas monótonas a aquellas cargas que se acumulan gradualmente con el tiempo, o que presentan efectos dinámicos insignificantes (Das & Ramana, 2010).

### **2.3.1.5. Otros tipos de cargas dinámicas.**

Existen ciertos casos de acciones dinámicas consideradas como especiales, por ejemplo, las cargas de impacto, como choques vehiculares contra edificios y puentes, el paso de vehículo o personas y explosiones (Hurtado Gómez, 2000).

## **2.3.2. Fundamentos de vibración.**

Los fundamentos de vibración que se introducen en esta investigación permiten entender los movimientos que se producen en un sistema, explicando la naturaleza de la vibración de edificaciones y otros sistemas estructurales, los cuales a lo largo de su vida útil soportan distintos tipos de sollicitaciones dinámicas, entre ellas los movimientos del terreno producidos por cargas sísmicas.

Se distinguen dos principales tipos de vibración: la vibración libre, que se presenta cuando un sistema se mantiene en movimiento por las fuerzas gravitatorias únicamente, y la vibración forzada que se genera por la aplicación de fuerzas externas al sistema (Hibbeler, 2010).

El número de coordenadas independientes necesarias para describir la solución de un sistema vibratorio se conoce como grado de libertad. El suelo de una fundación puede ser considerado como un sistema mecánico de masa y amortiguación (Das & Ramana, 2010).

Al tener un sistema de un solo grado de libertad, es más fácil llegar a comprender los conceptos de frecuencia natural, relación de amortiguamiento, el espectro de respuesta entre otros.

### 2.3.2.1. Vibración libre no amortiguada.

Es el tipo de movimiento vibratorio más simple. Las propiedades elásticas del suelo se ven representadas por un resorte de constante elástica  $k$ , y una carga  $W$  que simula el peso de la fundación situada en un área de fundación  $A$  (Das & Ramana, 2010), como se observa en la Figura 7.

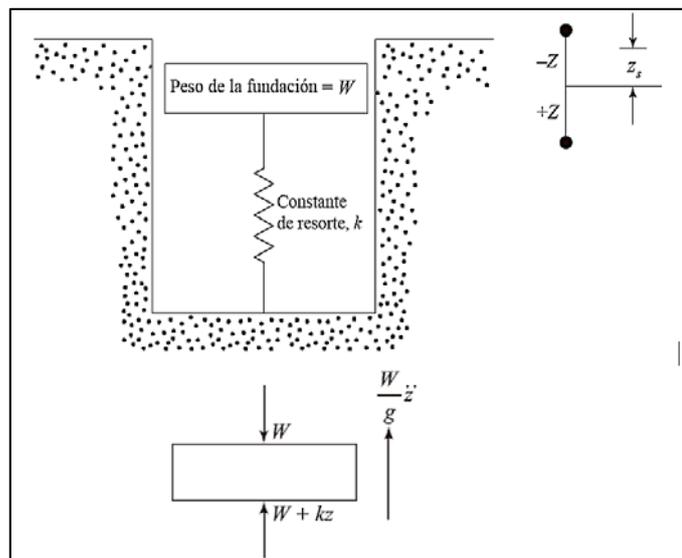


Figura 7. Vibración Libre de masa – resorte.  
Fuente: Das & Ramana, 2010.  
Elaboración: Los Autores.

Una deflexión estática  $Z_s$  se desarrollará por la carga  $W$ , la cual es relación entre la carga  $W$  y la constante elástica  $k$  del resorte. El sistema entrará a vibración cuando la fundación se altera desde su posición estática de equilibrio (Das & Ramana, 2010). De acuerdo a la segunda ley del movimiento de Newton, la ecuación que representa la vibración del sistema es:

$$\left(\frac{W}{g}\right)z'' + kz = 0 \quad (\text{Ec.3})$$

O de la forma:

$$\ddot{z} + \left(\frac{k}{m}\right)z = 0 \quad (\text{Ec.4})$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\ddot{z}$  es la aceleración o la segunda derivada del desplazamiento  $z$  desde la posición de equilibrio y  $m$  es la masa de la fundación. Si la base se altera de su posición estática de equilibrio, el sistema vibrará, al describir un movimiento armónico simple (Hibbeler, 2010).

En la Figura 8 se observa que el movimiento armónico simple tiene una forma sinusoidal, donde la magnitud del máximo desplazamiento o amplitud única es  $z$ . El tiempo necesario para que un ciclo se cumpla se conoce como periodo de la vibración y se determina con:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (\text{Ec.5})$$

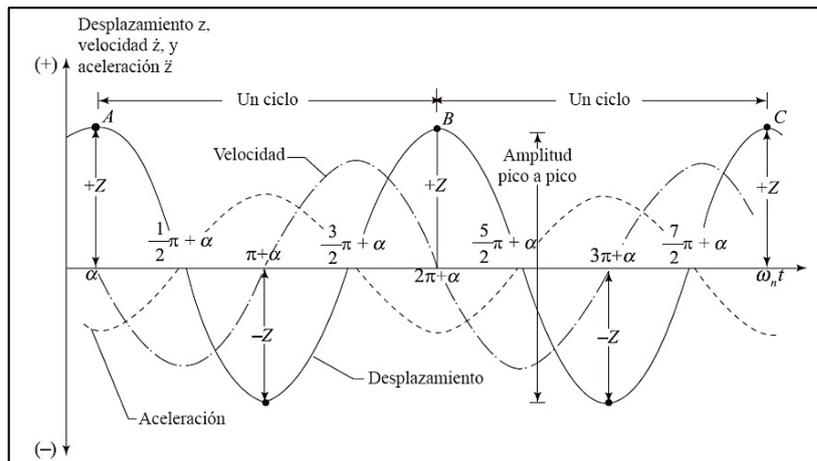


Figura 8. Visualización del desplazamiento, velocidad y aceleración.  
Fuente: Das & Ramana, 2010.  
Elaboración: Los Autores.

La frecuencia de oscilación se puede obtener a partir del periodo, o con el número de ciclos que se dan en una unidad de tiempo.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural no amortiguada del sistema, se obtiene a partir de la rigidez  $k$  y la masa  $m$  del sistema, de la forma:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{Ec.7})$$

### 2.3.2.2. Vibración forzada no amortiguada.

Al igual que en el sistema de vibración libre, se tiene en el sistema de vibración forzada el peso  $W$  que representa el peso de la fundación y lo que soporta, la constante  $k$  del resorte, pero se añade una fuerza alterna  $Q$  (Figura 9), que es igual a:

$$Q = Q_o \sin(\omega t + \beta) \quad (\text{Ec.8})$$

En la Ecuación 8,  $Q_o$  es la amplitud o máximo valor de la fuerza, con una frecuencia  $\omega$  de forzamiento o frecuencia de excitación (Chopra, 2014). Entonces la ecuación para este problema viene dada por:

$$m \ddot{z} + kz = Q_o \sin(\omega t + \beta) \quad (\text{Ec.9})$$

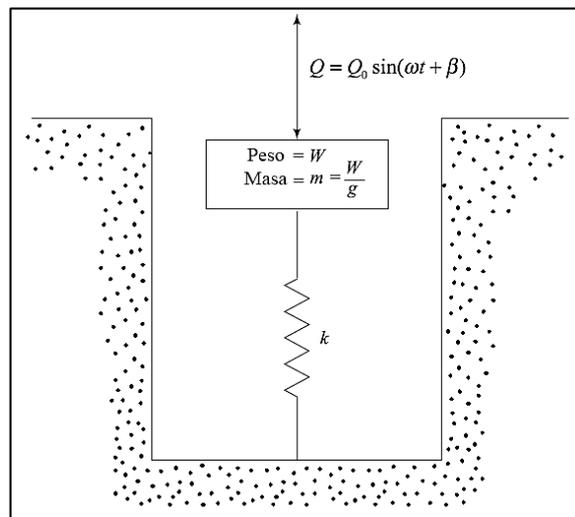


Figura 9. Sistema de vibración forzada de masa – resorte.  
Fuente: Das & Ramana, 2010.  
Elaboración: Los Autores.

Y la solución particular del sistema se representa por:

$$z = \frac{Q_o/k}{1 - (\omega^2/\omega_n^2)} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \quad (\text{Ec.10})$$

Dónde  $Q_o/k$  es la deflexión estática  $z_s$  y el término  $\omega^2/\omega_n^2$  es la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural, cuando dicha relación es igual a la unidad se genera resonancia.

Si se considera  $M$  como el factor de aumento o amplificación  $1/1 - (\omega^2/\omega_n^2)$  se puede observar la variación de éste factor respecto a la relación de frecuencias en la Figura 10, verificando que cuando  $\omega^2/\omega_n^2$  es igual a 1, los valores tienen al infinito.

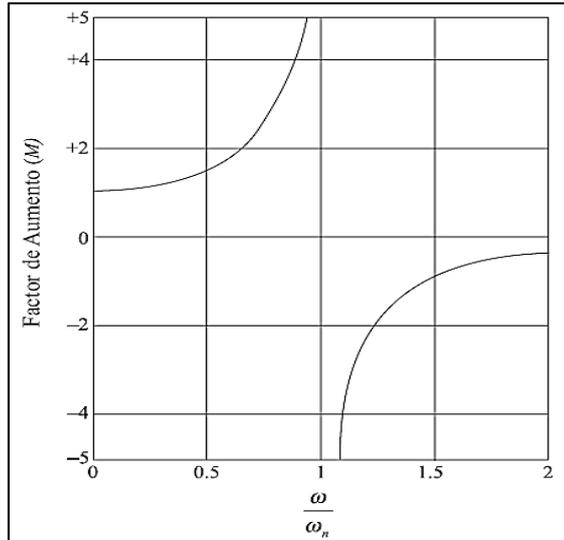


Figura 10. Variación del factor de aumento, respecto a la relación de frecuencias en vibración forzada no amortiguada.

Fuente: Das & Ramana, 2010.

Elaboración: Los Autores.

### 2.3.2.3. Vibraciones con amortiguamiento viscoso.

Si se considera que todo el sistema vibra, con el tiempo experimenta una reducción de forma gradual de la amplitud, este proceso se conoce como amortiguamiento. El amortiguador viscoso es el elemento de amortiguación de uso común, permite simular la disminución de la amplitud dentro del límite elástico de toda la estructura (Chopra, 2014).

En software de análisis dinámico, el amortiguamiento elástico más ampliamente utilizado es el amortiguamiento clásico o de Rayleigh, el cual es proporcional a las matrices de masa y rigidez inicial del sistema o en una combinación de ambas (Botero, 2002).

Cuando el análisis modal no es aplicable, se debe obtener la matriz de amortiguamiento de Rayleigh, que se presenta a partir de las matrices de masa y rigidez del sistema, de la siguiente manera:

$$[c] = a_0 [m] + a_1 [k] \quad (\text{Ec.11})$$

En esta expresión los coeficientes  $a$ , deben ser diferentes que cero, como condición para que exista amortiguamiento. De acuerdo a los grados de libertad que el sistema presente, se debe obtener los modos de vibración para cumplir con las condiciones de ortogonalidad y brindar la respuesta al problema dinámico, estos requisitos son elementales para que el amortiguamiento se considere como clásico; en caso de no obtener una matriz diagonal o no cumplir la condición de proporcionalidad, el amortiguamiento se denominará como no clásico (Botero, 2002).

### 2.3.2.4. Vibración libre con amortiguamiento viscoso.

En la Figura 11 se puede observar una fundación soportada por un resorte y el amortiguador de coeficiente  $c$ .

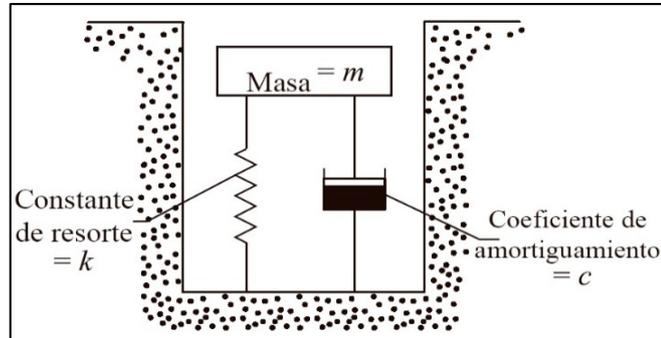


Figura 11. Sistema de vibración libre de masa – resorte – amortiguador.

Fuente: Das & Ramana, 2010.

Elaboración: Los Autores.

La ecuación que representa la vibración del sistema libre amortiguado es:

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + kz = 0 \quad (\text{Ec.12})$$

Se presentan 3 condiciones de amortiguamiento de acuerdo a la definición de la relación de amortiguamiento  $D$ , que relaciona el amortiguamiento del sistema  $c$  y el amortiguamiento crítico  $c_c$ .

$$D = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (\text{Ec.13})$$

- Si  $c/2m > \sqrt{k/m}$  el sistema será sobreamortiguado
- Si  $c/2m = \sqrt{k/m}$  el sistema será críticamente amortiguado, para este caso el amortiguamiento del sistema se iguala al amortiguamiento crítico  $c = c_c = \sqrt{k/m}$
- Si  $c/2m < \sqrt{k/m}$  el amortiguamiento será subamortiguado

El periodo de vibración estará en función de la frecuencia circular natural amortiguada

$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - D^2}$ , como se describe:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1 - D^2}} \quad (\text{Ec.14})$$

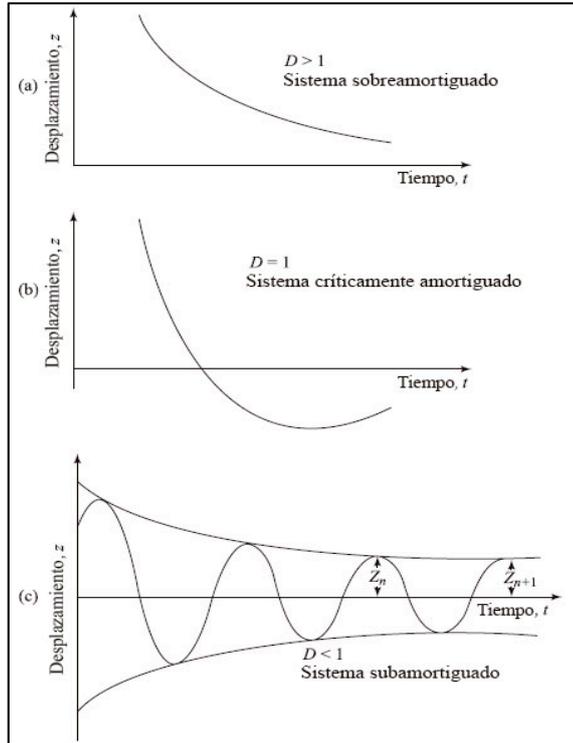


Figura 12. Condiciones de amortiguamiento para vibración libre amortiguada.  
Fuente: Das & Ramana, 2010.  
Elaboración: Los Autores.

### 2.3.2.5. Vibración forzada con amortiguamiento viscoso.

Para la vibración armónica o forzada, la ecuación de la respuesta del sistema que incluye el amortiguamiento, tiene la forma:

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + kz = Q_o \sin \omega t \quad (\text{Ec. 15})$$

Con la solución particular:

$$z = Z \cos(\omega t + \alpha) \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

$$Z = \frac{Q_o/m}{\sqrt{[1 - (\omega^2 / \omega_n^2)]^2 + 4D(\omega^2 / \omega_n^2)}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Y

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{k - m\omega^2}{c\omega} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{1 - (\omega^2 / \omega_n^2)}{2D(\omega^2 / \omega_n^2)} \right) \quad (\text{Ec. 18})$$

A diferencia de la vibración forzada sin amortiguamiento los valores máximos del factor de aumento o amplificación  $Z/(Q_o/k)$  no ocurren cuando la relación de la frecuencia de excitación

y la frecuencia natural se igualan a la unidad (Das & Ramana, 2010), sino que debido al amortiguamiento siguen el comportamiento de la Figura 13.

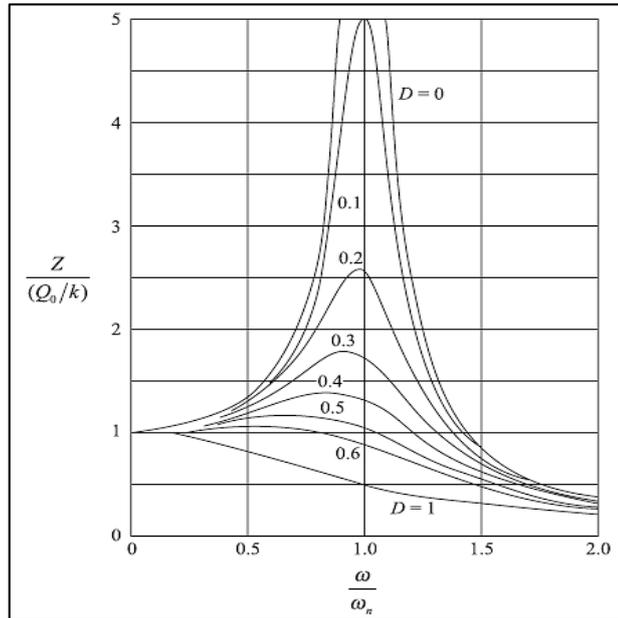


Figura 13. Variación del factor de aumento o de amplificación, respecto a la relación de frecuencias en vibración amortiguada.

Fuente: Das & Ramana, 2010.

Elaboración: Los Autores.

### 2.3.3. Parámetros dinámicos del suelo.

En la aplicación de una carga a una masa de suelo, la perturbación que se producirá será mediante ondas que se propagan de forma gradual a todo el elemento desde la fuente donde ésta ha sido aplicada (Das & Ramana, 2010). La propagación de las ondas permite determinar ciertos parámetros del suelo como el módulo de corte y amortiguamiento, los cuales influyen en la determinación de la respuesta dinámica del suelo. Dichos parámetros a su vez dependen de otras propiedades del suelo, entre ellas la relación de vacíos o índice de poros, la densidad relativa y la velocidad de las ondas de corte (Rodríguez Segurado, 2005).

La determinación de la respuesta dinámica del suelo se relaciona con la obtención de parámetros de diseño sismo resistente para las estructuras, por eso la importancia de realizar una caracterización sísmica de los suelos.

#### 2.3.3.1. Propiedades físicas y geotécnicas del suelo.

Antes de revisar los parámetros dinámicos del suelo se expondrán algunas propiedades físicas y geotécnicas dada su importancia para el estudio de la respuesta del suelo.

### 2.3.3.1.1. Relación de vacíos y porosidad.

La relación de vacíos  $e$ , es el cociente entre el volumen de vacíos  $V_v$  y volumen de sólidos en una masa de suelo  $V_s$ ; la porosidad  $n$ , en cambio, relaciona el volumen de vacíos y el volumen total de la muestra de suelo  $V$  (Rodríguez Segurado, 2005).

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{Ec.19})$$

Y

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (\text{Ec.20})$$

Además, se tiene una relación entre estas dos propiedades:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (\text{Ec.21})$$

### 2.3.3.1.2. Densidad relativa.

Es el parámetro que permite en suelos granulares medir el grado de compactación, y puede estar dado en términos de la relación de vacíos o del peso específico, como se muestra (Das, 2013):

$$D_r(\%) = \frac{e_{\text{máx}} - e}{e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}}} \cdot 100 \quad (\text{Ec.22})$$

O:

$$D_r(\%) = \left[ \frac{\gamma_d - \gamma_{d(\text{mín})}}{\gamma_{d(\text{máx})} - \gamma_{d(\text{mín})}} \right] \cdot \frac{\gamma_{d(\text{máx})}}{\gamma_d} \cdot 100 \quad (\text{Ec.23})$$

Donde  $e_{\text{máx}}$  es la relación de vacíos del suelo en el estado más suelto;  $e_{\text{mín}}$  sería la relación de vacíos en el estado más denso;  $e$  es la relación de vacíos in situ;  $\gamma_d$  es el peso específico seco in situ;  $\gamma_{d(\text{máx})}$  el peso específico seco en el estado más denso y  $\gamma_{d(\text{mín})}$  es el peso específico seco en el estado más suelto.

### 2.3.3.1.3. Permeabilidad hidráulica del suelo.

Permite conocer cuánta agua fluye a través de los espacios vacíos o poros que se encuentran entre las partículas del suelo por unidad de tiempo, de acuerdo a la ley de Darcy, a partir de la permeabilidad hidráulica del suelo  $k$ , se puede calcular la velocidad del flujo de agua a través de un suelo (Das, 2013):

$$v = k \cdot i \quad (\text{Ec.24})$$

Donde  $i$  sería el gradiente hidráulico.

#### 2.3.3.1.4. *Tensión efectiva y presión de poros.*

De acuerdo con la teoría de Terzaghi para los suelos saturados en una masa de suelo, si los espacios vacíos se rellenan de agua, se presentará una presión  $u$ , llamada presión neutra o presión de poros, la cual actúa sobre el agua y las partículas del suelo en todas las direcciones y con igual intensidad. La presión que actúa únicamente en las partículas sólidas del suelo saturado se denomina como tensión efectiva  $\sigma'$ , al sumar estas dos presiones se obtendrá la tensión total  $\sigma$  que actúa sobre un punto determinado en la masa de suelo (Vallejo, 2002).

En caso de no presentar cambios de volumen, distorsión o modificación de la resistencia al corte en un suelo saturado, significa que no hay variación en las tensiones efectivas (Vallejo, 2002).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (\text{Ec.25})$$

#### 2.3.3.2. *Coefficiente de Poisson.*

Es un parámetro dinámico que tiene una influencia reducida en la respuesta del suelo, éste es un valor adimensional que depende del tipo de suelo y de las condiciones de drenaje (Rodríguez Segurado, 2005). Se muestra en la Tabla 4 los valores típicos para arcilla, arena y roca.

Tabla 4. Coeficiente de Poisson para diferentes materiales.

Material	Coefficiente de Poisson $\nu$
Arcilla	0.40 – 0.45
Arena	0.30 – 0.40
Roca	0.15 – 0.25

Fuente: Rodríguez Segurado, 2005.  
Elaboración: Los Autores.

#### 2.3.3.3. *Rigidez del suelo y módulo de corte.*

Se puede realizar una aproximación acertada de la rigidez del suelo a partir del módulo de corte, la cual es una de las propiedades dinámicas más importantes, y se refiere a la relación de tensión de corte y deformación de corte en un punto determinado del diagrama tenso-deformacional (Rodríguez Segurado, 2005). Cuando se tiene un material elástico, el comportamiento lineal permitirá obtener un solo valor del módulo de corte con el valor de la pendiente del diagrama, cuando el material tiene un comportamiento no lineal, en cambio se forma una curva de histéresis en el diagrama, y se obtienen los módulos de corte máximo, tangente y secante (Santibañez Rodríguez, 2006), como se observa en la Figura 14.

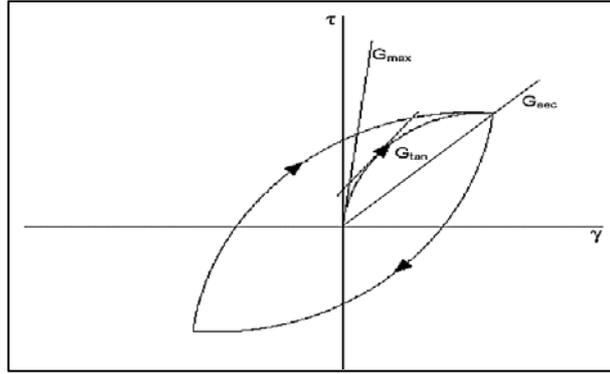


Figura 14. Diferentes módulos de corte en la curva de histéresis de un material no lineal.  
Fuente: Rodríguez Segurado, 2005.  
Elaboración: Los Autores.

En la Figura 14 el módulo de corte tangente  $G_{max}$  corresponde a la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente  $G_{tan}$ , es la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte tangente  $G_{sec}$  que se determina con la pendiente de la recta secante a la curva (Rodríguez Segurado, 2005). En los modelos elásticos, el valor que se puede utilizar para la caracterización del suelo es el módulo de corte máximo; si se necesita un análisis no lineal, se utiliza el módulo de corte tangente, no obstante, si se requiere un análisis lineal equivalente se utiliza el módulo de corte secante (Santibañez Rodríguez, 2006), y se expresan como:

$$G_{sec} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (\text{Ec.26})$$

$$G_{tan} = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (\text{Ec.27})$$

Y

$$G_{máx} = \rho \cdot v_s \quad (\text{Ec.28})$$

Donde  $\rho$  es la densidad natural del suelo y  $v_s$  es la velocidad de las ondas de corte. Cuando se tiene un material isótropo, el módulo de corte  $G$ , se puede determinar a partir del coeficiente de Poisson,  $\nu$  y el módulo de elasticidad  $E$ .

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{Ec.29})$$

#### 2.3.3.4. Razón de amortiguamiento.

Permite expresar la capacidad que tiene un material para disipar la energía y se determina con:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{A_L}{2\pi \cdot G_{sec} \cdot \gamma_c^2} \quad (\text{Ec.30})$$

Donde  $W_D$  es la energía disipada,  $W_S$  es la energía entregada al suelo que causa la deformación máxima, y  $A_L$  es el área del lazo del ciclo de histéresis (Rodríguez Segurado, 2005).

El módulo de corte es inversamente proporcional a los valores de deformación, pero la razón de amortiguamiento, en cambio, es directamente proporcional a la deformación de corte, entonces la respuesta dinámica que el suelo presente dependerá del nivel de sollicitación, cuanto menor sea la tensión de carga, el suelo será más deformable, pero presentará mayor capacidad de amortiguamiento de acuerdo a Santibañez Rodríguez (2006).

## **2.4. Fenómeno de licuefacción de suelos.**

En los siguientes apartados se describe el fenómeno de licuefacción de suelos desde sus generalidades, factores desencadenantes, efectos, enfoques de estudio y los métodos para su evaluación y mitigación. Se expone la importancia de su estudio y se establece la base teórica en la cual se fundamenta el trabajo realizado en la presente investigación sobre la licuefacción de suelos.

### **2.4.1. Generalidades del fenómeno.**

Se define la licuefacción de suelos como el proceso de disminución súbita de rigidez por la acción de cargas cíclicas o de sismo que se presenta en los suelos saturados, donde éstos por un corto tiempo se comportan como un líquido viscoso (Mussio, 2012).

Dentro de la dinámica de suelos la evidencia histórica ha demostrado que la licuefacción es uno de los fenómenos más interesantes y catastróficos. A día de hoy los diversos estudios realizados no han dado con una definición íntegra del fenómeno pese a ser causante de cuantiosas pérdidas económicas y humanas. Para suplir esta deficiencia varios enfoques de análisis se han propuesto para explicar el fenómeno, determinar su potencial destructivo y establecer medidas de mitigación; de los que se hablará posteriormente en esta investigación.

Los eventos sísmicos registrados en 1964 en las ciudades de Niigata – Japón y Anchorage – Estados Unidos evidenciaron a profundidad los efectos catastróficos del fenómeno de licuefacción y la importancia de su estudio. Desde entonces varios de terremotos importantes han revelado observaciones adicionales sobre el comportamiento del mismo, tales como los registrados en Loma Prieta – California (1971), Kobe – Japón (1995) y los sismos de 1999 registrados en Kocaeli – Turquía y en Chi-Chi – Taiwán (Idriss & Boulanger, 2008).

#### **2.4.1.1. Origen del término.**

Las primeras investigaciones técnicas de evidencia de licuefacción se remontan a inicios del siglo XX o anterior. En el año 372 AC, toda la ciudad costera de Helice en Grecia desapareció bajo el mar luego de que se produjera un gran sismo y en 1861 el mismo lugar fue afectado

por un sismo de menor intensidad. Schmidt (1875) publicó los resultados de sus estudios en la zona afectada, los cuales describió como grandes desplazamientos laterales y hundimientos de tierra a lo largo de la costa (Wang & Manga, 2009).

En Holanda, Koppejan et al. (1948) publicaron un artículo en el cual mencionan los deslizamientos costeros, en particular, los deslizamientos de flujo observados en el año 1918 cerca de un puente de la ciudad de Weesp – Holanda del Norte provocados por las vibraciones de los trenes circulantes. En esa misma época, Hazen (1918) utilizó las características de la licuefacción para describir las causas y efectos de falla de la presa Calaveras – California, dando especial énfasis a la presión de poros y esfuerzos efectivos (Jefferies & Been, 2015).

El término licuefacción fue empleado por primera vez por Casagrande (1936) para referirse a arenas con comportamientos contractivos que bajo ciertas condiciones de esfuerzos cortantes desarrollaban una elevada presión de poros y disminución de su resistencia (Mussio, 2012); el término licuefacción espontánea fue empleado por Terzaghi y Peek (1948) para explicar desplazamientos de flujo en suelos sin una aparente actividad dinámica que active el proceso.

Los pioneros en el estudio del fenómeno B. Seed & Lee (1966), expresan que las arenas saturadas cuando son sometidas a vibración tienden a compactarse y disminuir de volumen; al disminuir el volumen se incrementa la presión de poros por falta de drenaje. Si el esfuerzo confinante del suelo es igual al incremento de presión de poros, las arenas pierden su resistencia al esfuerzo cortante y se genera la licuefacción.

A partir de este punto, diversas descripciones se han planteado para definir el fenómeno: en los estudios de Casagrande (1975) se diferenció la licuefacción total de la movilidad cíclica. La licuefacción total se caracteriza por el incremento de la presión de poros, reducción de resistencia asociada a grandes deformaciones y disminución de volumen; la movilidad cíclica que también se identifica por un gran incremento de presión de poros, se vincula a una pérdida de rigidez, deformaciones de menor orden y fallas repentinas.

En épocas recientes, Youd T. L. & Idriss I. M. (2001) basándose en las expresiones de Marcuson (1978) “la licuefacción es definida como la transformación de un material granular de estado sólido a un estado licuado como consecuencia del incremento de la presión de poros y una reducción del esfuerzo efectivo”, complementan que el cambio de estado es más factible en suelos granulares de sueltos a moderadamente densos con poco drenaje, como las arenas limosas o gravas que contienen sedimentos impermeables.

La licuefacción según Kramer (1988) es el proceso donde los suelos sueltos, saturados y sin cohesión acumulan exceso de presión de poro debido a la aplicación no drenada de esfuerzos de corte estáticos o cíclicos y sufren a menudo una dramática reducción de la resistencia al

corte. Entre las principales características se menciona: repentina manifestación, fallas planas en los lugares afectados, gran desplazamiento de los materiales licuados y de desarrollo progresivo.

Por su parte, Idriss & Boulanger (2008) definen que la licuefacción ocurre en depósitos de arena saturada durante los terremotos y es el fenómeno causante de los daños más dramáticos en infraestructuras. La arena suelta se contrae bajo la carga cíclica del sismo que ejerce un esfuerzo normal desde la matriz de arena hacia los espacios intersticiales. Los espacios ocupados de agua no pueden drenarse durante la agitación, lo que provoca la reducción de la tensión efectiva de confinamiento dentro del suelo y una pérdida asociada de resistencia y rigidez, que contribuyen a las deformaciones del depósito de suelo.

#### **2.4.1.2. Descripción del proceso.**

Al generarse la licuefacción, dentro de la masa de suelo suceden una serie de eventos que desencadenan la falla o colapso de la misma. La complejidad del fenómeno ha permitido el planteamiento de diversas interpretaciones de la ocurrencia de la licuefacción. Lo mayormente aceptado es la generación del exceso de presión de poros en suelos granulares saturados cuando soportan esfuerzos cortantes y el contenido de agua no puede drenar, debido al reacomodamiento de partículas y disminución del volumen.

El exceso de presión de poro contrarresta al esfuerzo efectivo confinante. Si estos dos parámetros se igualan la capacidad de soporte de los suelos granulares se reduce a cero y se llega a comportar como un líquido viscoso sin rigidez o resistencia. La licuefacción comúnmente se desarrolla a través de cuatro fases (Ter-Martirosyan, Sobolev, & Merkin, 2016), como se muestra en la Figura 15.

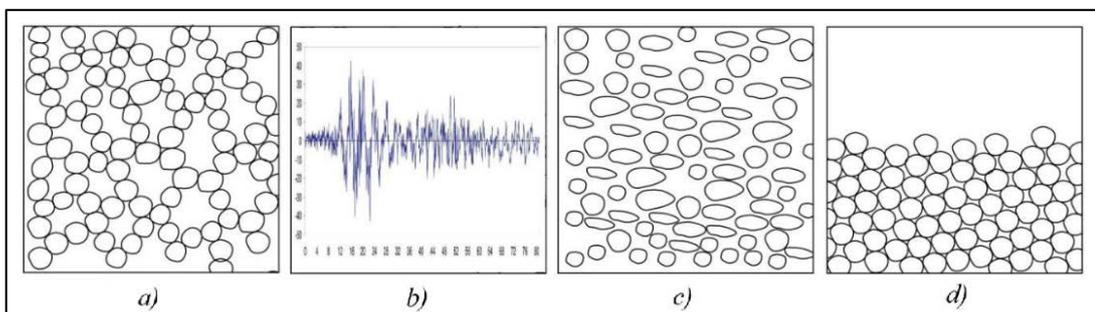


Figura 15. Proceso del fenómeno de licuefacción a) depósito de suelo inalterado; b) efecto de carga sísmica; c) estructura del depósito colapsado; d) depósito de suelo restituído.

Fuente: Ter-Martirosyan, Sobolev, & Merkin, 2016.

Elaboración: Los Autores.

a) El depósito de suelo saturado

En condiciones inalteradas el depósito está conformado por partículas individuales de suelo apoyadas mutuamente que generan fuerzas de fricción y confinamiento con dotación de

rigidez y estabilidad al conjunto. Al estar saturado, el agua ocupa todos los espacios intersticiales.

b) **Solicitud de cargas externas al depósito de suelo**

Las solicitaciones estáticas ocurren con un incremento gradual y progresivo de intensidad mediante extensos intervalos de tiempo. Las solicitaciones de carga cíclicas por su parte se desarrollan de manera violenta y espontánea, que fluctúan en fracciones de segundo; por ejemplo, la carga de un sismo cuya duración total es relativamente corta.

Las cargas cíclicas tienen rápidas alternaciones entre intensidades positivas y negativas que generan un reacomodamiento de las partículas al llenar los poros o espacios vacíos existentes, lo cual se conoce como una reducción del volumen.

c) **Perturbación de la estructura del suelo**

El depósito de suelo al no poder drenar el agua contenida en su interior rápidamente, presenta una reducción del volumen de la masa. Las partículas se reordenan y los espacios se van cerrando, el agua atrapada en el interior es sometida a presiones cada vez más altas. El agua es un líquido incompresible que reacciona al incrementar la presión intersticial hacia las partículas adyacentes.

El incremento de la presión de agua puede ser tan alta, que puede forzar la separación de partículas al disminuir las superficies de contacto y la fricción entre ellas. Cuando la presión de poros iguala la tensión efectiva o tensión de confinamiento, las partículas de suelo se encuentran flotando libremente, lo que ocasiona que el depósito de suelo se comporte como un líquido viscoso sin resistencia ni estabilidad, mientras se encuentra una conformación estructural más estable y la presión de agua disminuya. Si el manto licuado se encuentra cerca de la superficie el exceso de presión hace que el agua o masa licuada se filtre a la superficie a través de los denominados volcanes de arena.

d) **Reacomodamiento y consolidación de las partículas**

Cuando la solicitud de cargas finaliza o ha pasado un tiempo considerable para permitir el drenaje, el depósito de suelo deja de comportarse como un líquido viscoso y encuentra una conformación más densa y estable. Las partículas reagrupadas se consolidan y la cantidad de espacios intersticiales es significativamente menor. Se observa grandes deformaciones y reducción de volumen.

**2.4.1.3. Enfoques de estudio.**

Se han planteado diversas metodologías para llegar a un entendimiento exhaustivo del fenómeno de licuefacción, sus peligros y medidas de mitigación.

Entre las dificultades de estos planteamientos para cumplir su propósito se tiene que la mayoría se basan en un solo método lo cual lleva a una falta de validación de los resultados obtenidos y que la mayoría de análisis realizan un acercamiento semi – cuantitativo al fenómeno, cuando un análisis cuantitativo íntegro sería más apropiado: a través de enfoques múltiples se lograría una perspectiva más amplia del mismo para esclarecer la complejidad propia del fenómeno de licuefacción y su estudio.

Los principales enfoques para un exhaustivo estudio de la licuefacción según Huang & Yu (2017) incluyen los ensayos de campo y ensayos experimentales para medir el potencial de licuefacción, la simulación numérica del fenómeno de licuefacción y la evaluación de riesgos constitutivos del fenómeno:

- Análisis mediante ensayos in situ

Las pruebas de campo complementadas por ensayos de laboratorio son la metodología más extendida y empleada para analizar el potencial de licuefacción. Estos métodos presentan complicaciones en la extracción de muestras sin alterar la disposición natural del suelo para las pruebas de laboratorio, por esto los resultados de los ensayos en campo suelen ser suficientes y típicamente empleados para establecer correlaciones y determinar factores de seguridad del potencial de licuefacción.

Los ensayos in situ que mayormente se puede emplear en el análisis de la licuefacción son: el ensayo de penetración estándar (SPT), ensayo de penetración de cono (CPT), prueba de penetración de Becker (BPT) y velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). Dentro de la ingeniería, emplear estos métodos para determinar factores de seguridad son el resultado más aceptable y extendido; no obstante, al no verificarse con otros procedimientos se corre el riesgo de valorar equivocadamente la peligrosidad de licuefacción.

- Análisis mediante ensayos experimentales

Los ensayos experimentales establecidos como las pruebas de mesa vibratoria, modelo dinámico de centrífuga o ensayos dinámicos de laboratorio en suelos (triaxial dinámico, ensayo de columna resonante, entre otros) también permiten establecer el potencial de licuefacción y observar las características de este fenómeno.

Estas metodologías orientadas principalmente a un uso investigativo han sido empleadas con diversas finalidades durante mucho tiempo. B. Seed & Lee (1966) expresaron que la activación de la licuefacción se da al igualar la presión de poros al esfuerzo efectivo, en base a los resultados obtenidos con ensayos triaxiales dinámicos. Los ensayos de columna resonante y triaxial dinámico muestran a una modelación mejor definida y resultados más

confiables por la posibilidad de controlar las condiciones de contorno y propiedades de los materiales que se usan durante los ensayos. Huang & Yu (2017) expresan que los ensayos de mesa vibratoria y de centrífuga modelan eficientemente los parámetros clave de esfuerzos generados por acciones de solicitaciones externas, como sismos o cargas estáticas.

- Análisis mediante simulación numérica

Con las metodologías explicadas anteriormente se puede notar que el estudio de la licuefacción desde sus inicios fue orientado a establecer el potencial de ocurrencia, más no en la predicción de los efectos y deformaciones una vez que la licuefacción se ha generado.

Se ha demostrado la importancia del análisis de las deformaciones post – ocurrencia a partir de las observaciones del fenómeno y los daños causados principalmente por el desplazamiento de flujo característico de los suelos licuados en infraestructura, vías, puentes, entre otros. Este análisis puede ser implementado de manera eficiente al usar modelos numéricos o constitutivos referidos a simplificaciones matemáticas de la relación esfuerzo – deformación de un sistema. Éstas incluyen únicamente las propiedades más importantes del elemento modelado con la consideración de ser aplicadas a los escenarios para los que fueron desarrollados y validados (González, Herrera, Coronel, E, & López, 2013).

Para la simulación de respuesta dinámica se pueden emplear dos representaciones: mediante esfuerzos totales y esfuerzos efectivos. Se emplea usualmente el análisis mediante esfuerzos totales para identificar la fase de licuefacción inicial, sin lograr describir por completo el fenómeno de licuefacción, de acuerdo a Biot (1941) que señala la imposibilidad de simular la reducción de rigidez y resistencia del suelo post ocurrencia del fenómeno. El análisis mediante esfuerzos efectivos permite registrar la interacción entre espacios o poros al simular eficientemente el esqueleto del suelo, por tanto, captar las etapas finales de la licuefacción (Huang & Yu, 2017).

Dafalias y Popov (1975) y Pastor et al. (1990) desarrollaron un método de análisis constitutivo elasto – plástico mediante esfuerzos efectivos. Las investigaciones que surgieron en etapas posteriores han logrado implementarlo como un análisis 2D y 3D, además de orientarse al estudio del método de análisis de esfuerzos totales, esfuerzos efectivos y ajustar la implementación de un modelo constitutivo.

Los modelos constitutivos se pueden dividir en dos categorías generales: el modelo de análisis lineal equivalente basado en un modelo viscoelástico equivalente; y el modelo de análisis no lineal basado en un modelo viscoelástico – plástico. El modelo lineal equivalente es ampliamente usado en el análisis dinámico del suelo, puede determinar de forma más razonable la aceleración, esfuerzo y deformación de corte durante un sismo; con la limitación

de no considerar la deformación acumulada bajo cargas dinámicas al solo describir la No Linealidad e histéresis dinámica de la relación esfuerzo – deformación, y considera el mismo módulo tanto para carga y descarga; así, para calcular la deformación residual y permanente se debe establecer un nuevo modelo de deformaciones residuales.

Al implementarse el modelo no lineal elasto – plástico generalizado, se incluye: el modelo de superficies múltiples de rendimiento, el modelo de superficies en condiciones de borde y el modelo de mecanismos múltiples de corte. Este modelo logra una aproximación más cercana de la respuesta real del suelo a sollicitaciones dinámicas y puede caracterizar por completo la relación esfuerzo – deformación dinámica del suelo, también permite registrar variables como la compresión, contracción y dilatación por esfuerzos de corte, la deformación elástica, la deformación residual y permanente, entre otras. Las principales limitaciones que posee este método están relacionadas a la complejidad del mismo, los valores de los parámetros necesarios son difíciles de obtener con precisión y su implementación es más complicada (Huang & Yu, 2017).

#### **2.4.2. Caracterización del fenómeno.**

##### **2.4.2.1. Experiencias con la generación de licuefacción.**

A continuación se muestra una recopilación de eventos donde se registró licuefacción con diferentes variantes y particularidades:

###### **2.4.2.1.1. Licuefacción estática: Presa Fort Peck.**

La presa se comenzó a construir en el año 1934 sobre el río Misuri – Montana, a unos 70 km de la frontera con Canadá. Los suelos aluviales y arenas del río fueron bombeados al margen exterior del relleno, esto formó playas con inclinación hacia el centro de la presa, por acción de la gravedad el material granular se depositó en los bordes exteriores y el material más fino se acomodó hacia la parte central y baja de las playas. La cimentación consistió en arenas aluviales, gravas y arcillas.

En 1938, cerca de finalizar la construcción, se produjo un gran desplazamiento de la parte superior de la presa. En el momento del fallo, la presa tenía unos 60 m de altura con una pendiente media de 4H:1V. El colapso se generó a lo largo de 500 m y fue precedido por abombamiento al menos 12 horas antes de la falla. Luego se evidenciaron movimientos de flujo, con desplazamientos grandes de hasta 450 m. Cerca de 7,5 millones de m<sup>3</sup> de material estuvieron involucrados en el colapso y ocho hombres perdieron la vida. En la Figura 16 puede apreciarse la falla ocurrida en la presa Fort Peck.

Una comisión de 9 investigadores fue solicitada para evaluar las causas y efectos del colapso de la presa. Diversos criterios trataban de explicar el colapso de la estructura; si bien, la

mayoría acordó que se debió a una falla por esfuerzo de corte entre la cimentación y la base fundación, la minoría, entre ellos Casagrande, opinaron que el desplazamiento de gran magnitud y la falla por esfuerzos de corte fueron propiciados por acción de la licuefacción (Jefferies & Been, 2015).



Figura 16. Vista aérea de la falla de la presa Fort Peck (Cuerpo de ingenieros del ejército E.U.A.).

Fuente: Jefferies & Been, 2015.

Elaboración: Los Autores.

#### 2.4.2.1.2. *Licuefacción en sismo de Niigata.*

Los eventos de Niigata – Japón y Alaska – Estados Unidos en el año 1964 alertaron a la comunidad investigativa de las catastróficas consecuencias de la licuefacción. El sismo registrado el 16 de junio de 1964 afectó principalmente a la ciudad costera de Niigata; tuvo su epicentro a 55 km del norte de la ciudad y registró una magnitud de 7.3 en la escala de Richter. La ciudad descansa sobre orillas del río Shinano, donde entra el mar, la estructura del suelo se conforma principalmente por un estrato superficial de 30 metros de arena aluvial, como se observa en la Figura 17.

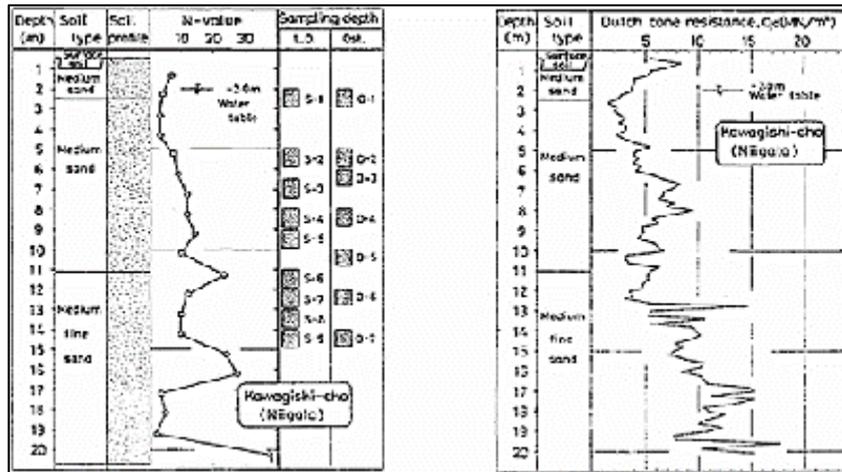


Figura 17. Perfil de suelo y ensayo de resistencia CPT en Kawagishi-cho – Niigata.

Fuente: Jefferies & Been, 2015.

Elaboración: Los Autores.

Cuando se produjo el sismo, la mayoría de daños registrados se ocasionaron por la activación de la licuefacción: se observó la formación de volcanes de arena, la emersión de tuberías y pozos de alcantarillado, asentamientos diferenciales excesivos y edificios que se inclinaron por completo sin una visible falla estructural lo que da indicios de falla a nivel de superficies de cimentación, como el caso del edificio de departamentos de la Figura 18.



Figura 18. Edificio de departamentos en Kawagishi-cho que se inclinó y rotó debido a una falla de cimentación por la licuefacción.

Fuente: Jefferies & Been, 2015.

Elaboración: Los Autores.

Se informó que hasta 20 minutos luego del sismo los volcanes de arenas seguían expulsando agua y suelos licuados o flujos. Cinco vigas simplemente soportadas del puente Showa cayeron cuando los pilares de soporte perdieron estabilidad vertical debido a la ocurrencia de licuefacción en los suelos de cimentación (Jefferies & Been, 2015).

Uno de los puntos que más ha llamado la atención del sismo de Niigata es la zona norte del río Shinano, que casi en su totalidad se vio afectada por el fenómeno de licuefacción. El sector ubicado en la otra orilla del río, al sur, prácticamente no se registró ningún daño. Entre ambos sitios no existe una distancia superior a 2 km, sin embargo, presentaron cada uno una respuesta totalmente diferente a la ocurrencia de licuefacción.

#### 2.4.2.1.3. *Licuefacción post-sismo: Presa San Fernando.*

En el año 1971 un sismo afectó la presa San Fernando de una manera particular: la presa falló parcialmente, pero no hasta cerca de un minuto después de que la actividad sísmica haya finalizado. Esto ocasionó mayor confusión acerca del uso del término licuefacción y las diversas variantes con las que se le había relacionado, entre ellas movilidad cíclica, licuefacción cíclica, ablandamiento cíclico o licuefacción estática.

La presa San Fernando de 43 m de altura, abastecía el 80% de la dotación de agua para la ciudad de Los Ángeles. El esfuerzo provocado luego del sismo causó la falla de los 30 m superiores de la presa, que amenazaba a la población ubicada en las zonas bajas del valle, de aproximadamente 80 000 personas. Se evitó el desastre al lograr drenar rápidamente el dique antes de que este cediera por completo. La falla de la presa se observa en la Figura 19.



Figura 19. Presa de San Fernando. Izquierda: situación de la presa antes de la falla. Derecha: detalle del dique luego de la falla.

Fuente: Jefferies & Been, 2015.

Elaboración: Los Autores.

Se concluyó que la carga sísmica generó un incremento de la presión de poros que activó la licuefacción, lo cual es un desencadenante indirecto del colapso del dique de contención. Las fallas en las presas de Fort Peck y San Francisco demostraron de la necesidad de mayor control en la construcción de estas, diversas evaluaciones de vulnerabilidad sísmica y métodos de construcción fueron encargados después del acontecimiento de estos eventos (Jefferies & Been, 2015).

#### 2.4.2.1.4. *Licuefacción en sitios de desechos de minas: Aberfan.*

La actividad minera en el pueblo de Aberfan en el sur de Gales con prácticas descuidadas y poco control de seguridad ocasionó un desastre en el año 1996, donde 44 personas perdieron la vida cuando un depósito de desechos de material de minería cedió, como se muestra en la Figura 20.

Los desechos de la actividad minera eran acomodados hacia una cara de la colina donde se realizaba la explotación. Estos desechos sin compactar y por gravedad los sedimentos más finos colocados en fondo, necesitaban un factor desencadenante: la hidrogeología del sitio. Después de que una lluvia intensa saturó estos residuos sin un drenaje adecuado en la parte inferior, la presión de poros se empezó a incrementar de tal forma que era inevitable el colapso de este depósito.

El colapso se desarrolló progresivamente: el día 21 de octubre de 1996, alrededor de las 7:00am el depósito había cedido unos 3 m, una hora más tarde, cerca de 6 m y era observable el desplazamiento lento de la masa. Cuando finalmente se generó el flujo rápido, este descendió unos 500 m sobre la pendiente de la ladera hasta alcanzar la escuela secundaria de Aberfan destruyéndola casi en su totalidad y cubriendo posteriormente unos 100 m de carretera, el depósito desplazado ocupó una profundidad de 9 m. La masa fluida involucró unos 107 000 m<sup>3</sup> de material y se desplazaba a una velocidad aproximada de 15 a 35 km/h. Las víctimas fueron en su gran mayoría los niños de la escuela secundaria (Jefferies & Been, 2015).

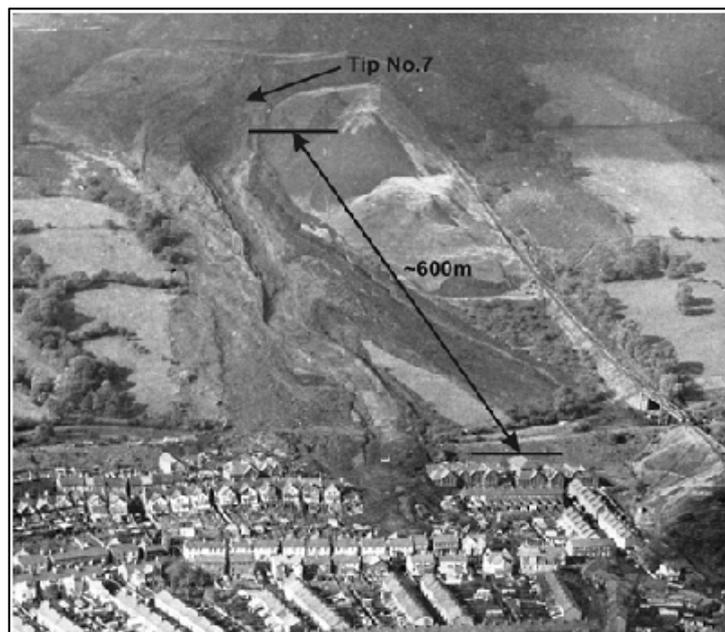


Figura 20. Deslizamiento de flujo en Abefan luego de la falla.  
Fuente: Jefferies & Been, 2015.  
Elaboración: Los Autores.

#### 2.4.2.1.5. *Licuefacción inducida por máquinas vibratorias.*

Se ha registrado eventos de licuefacción a pequeña escala, como el terraplén de la vía que atravesaba el lago de Michigan. Este terraplén llegó a colapsar por el paso de un convoy de camiones de prospecciones geofísicas petroleras.

El terraplén que permitía que la carretera 94 de Michigan atravesara el lago Ackerman se construyó con arenas y gravas limpias, tenía una superficie entre 2 y 4 metros sobre el nivel de agua y un relleno debidamente compactado. Un lado del terraplén tenía pendiente de 2H:1V y el otro lado 3H:1V.

Según describe Hryciw et al., (1990), el fallo del terraplén el 24 de junio de 1987 se dio por la sobrecarga generada al circular seis vehículos de prospección geofísica petrolera: estos vehículos estaban equipados con una placa de vibrosis, la cual se presiona a la superficie del suelo y por un vibrador de peso excéntrico controlado por computadora se puede aplicar excitación a la masa de suelo en la frecuencia o amplitud que se requiera.

Cuando se generó la falla, los seis camiones habían sido dispuestos como un tren de 74 m de longitud y mantenían una frecuencia de vibración sintonizada. Los vehículos: segundo, tercero y quinto se hundieron mientras la licuefacción se activaba en el terraplén, el cuarto vehículo quedó flotando en una superficie fallada, el conductor del último vehículo vio el fallo adelante y pudo detenerse antes de caer en la zona de licuefacción, esto puede apreciarse mejor en la Figura 21. Los conductores reportaron sentir hundirse en caída libre como si el suelo hubiese desaparecido por completo. El colapso se dio violentamente por lo que se generó una ola de 4.5 m que cruzó el lago y afectó el muelle (Jefferies & Been, 2015).



Figura 21. Izquierda: tren de vehículos de prospección geotécnica. Derecha: Licuefacción inducida por las placas de vibrosis en arenas saturadas.

Fuente: Jefferies & Been, 2015.

Elaboración: Los Autores.

#### 2.4.2.2. *Distribución de la ocurrencia de licuefacción.*

La licuefacción usualmente ocurre cerca de zonas costeras, riveras de ríos, lagos que son sitios caracterizados por la presencia de suelos granulares saturados y se distribuyen por lo general cerca del epicentro de la carga cíclica.

En los terremotos del Golfo de Kachchh y Bhuj en el año 2001, los fenómenos de licuefacción se registraron principalmente a lo largo de la orilla del Lago Pinios; de igual manera en el terremoto de 2008 en Grecia (Margaris et al., 2010). En el terremoto del Gran Este de Japón de 2011, Yamaguchi et al (2012) observaron que muchos sitios licuados estaban en antiguos lechos de ríos y áreas desarrolladas cerca de la bahía de Tokio. En el terremoto de Chile de 2010 (Verdugo 2011), la licuación más alejada al norte estuvo en los depósitos residuales de la Veta del Agua, mientras que la licuación más dispersa al sur fue en los lagos Calafquén y Panguipulli (Huang & Yu, 2017).

#### **2.4.2.3. Susceptibilidad al fenómeno de licuefacción.**

Uno de los principales problemas del análisis de la licuefacción es determinar el potencial de ocurrencia de manera precisa. La susceptibilidad a licuar no es igual en todos los suelos, por lo tanto Kramer & Stewart (2004) proponen cuatro factores para evaluar la susceptibilidad de los suelos:

Observaciones históricas: Es frecuente que la licuefacción vuelva a ocurrir en las mismas locaciones siempre que las condiciones sean propicias, o según van conformándose los nuevos estratos de acuerdo a las edades geológicas. Este es un criterio amplio y generalizado que indique posibles sitios con potencial de licuefacción.

Observaciones geológicas: Los depósitos de suelos fluviales, coluviales y eólicos si se encuentran saturados poseen alta susceptibilidad a licuar. En menor magnitud, los suelos aluviales, planos, costeros o de estuarios también favorecen la licuefacción. Los suelos jóvenes típicamente más sueltos son susceptibles en mayor medida que los antiguos mejor consolidados.

Composición del suelo: Un criterio importante que define la susceptibilidad de licuefacción es la conformación física del suelo. Las arenas limpias, sin contenido de finos y partículas redondeadas son características inherentes a suelos licuables. Mientras que suelos mejor gradados, con contenido de finos plásticos ( $IP > 10$ ) y partículas angulosas atenúan el riesgo de licuefacción.

Estado in situ del suelo: por ejemplo la densidad relativa o la magnitud del esfuerzo de confinamiento del suelo. Los suelos susceptibles a licuar son los suelos sueltos que afectados por cargas cíclicas tienden a reducir su volumen y densificarse. Si los suelos tienen elevadas presiones de confinamiento se reduce la susceptibilidad a licuar a razón de requerir elevados incrementos de la presión de poro para que la resistencia del suelo disminuya considerablemente.

#### 2.4.2.3.1. Factores que influyen en el potencial de licuefacción.

Para que un suelo presente licuefacción, los siguientes parámetros son los más relevantes según las observaciones e investigaciones realizadas:

##### a) Tipo de suelos

Los depósitos de origen aluvial, fluvial, eólicos o rellenos usualmente se sedimentan sin lograr compactarse, los sólidos finos ocupan los espacios inferiores y las partículas granulares se ubican en la superficie. En la Tabla 5 se resume la investigación de Kramer (1988) sobre suelos licuados que se observaron en terremotos importantes:

Tabla 5. Comparación de registros históricos de suelos involucrados en licuefacción.

<b>Deslizamiento de flujo</b>	<b>Descripción del suelo</b>
Puerto Trondheim - Suiza, 1888	Arena fina limosa
Orklasford - Noruega, 1933	Arena fina suelta, limos, arcilla limosa
Hommelivika – Noruega, 1942	Arena fina suelta
Follafjorden - Holanda, 1952	Arena fina suelta, limos
Rio Mississippi – EUA, 1947	Arena fina suelta, arena fina, media
Howe Sound – Inglaterra, 1955	Arena limpia, grava

Fuente: Kramer, 1988.

Elaboración: Los Autores.

La licuefacción está asociada a los suelos no cohesivos saturados, aquellos con granulometría uniforme que favorecen la formación de espacios intersticiales. Sin embargo, las arenas no son los únicos suelos que pueden licuar: experimentalmente se ha demostrado que la inclusión de cantidades pequeñas de limo y arcilla dentro de la matriz arenosa reduce el contacto entre partículas, lo que afecta la rigidez y estabilidad de la masa de suelo (Ovando; 1986).

##### b) Densidad relativa

Casagrande (1936), en sus estudios observó que la relación de vacíos y densidad relativa de un suelo se relaciona fuertemente al fenómeno. Los suelos de densidades relativas bajas licuaban bajo intensidades de sismo pequeñas; los más densos en cambio sufrían deformación de menor orden.

Los suelos no cohesivos tienden a desplazarse por toda la masa, reacomodarse y reducir su volumen por los espacios intersticiales y partículas sin compactación bajo sollicitaciones de cargas dinámicas. Mientras mayor sea la cantidad de agua retenida en el interior, mayor será el incremento de presión de poro que se genere. Los suelos densos están mejor consolidados y tienen menos espacios ocupados por el agua, lo que implica menores probabilidades de licuar.

c) Profundidad del nivel freático

El nivel freático puede ser el factor más importante para activar la licuefacción. A la profundidad en que se encuentre se determina la saturación del suelo y por consiguiente los espacios intersticiales que están ocupados por agua. Durante el sismo, la presión del agua producida por la densificación afectará directamente al esfuerzo efectivo confinante. Mientras más superficial sea la ubicación del nivel freático mayor será la posibilidad de que la presión de poros iguale el esfuerzo efectivo y la masa de suelo se comporte como un fluido.

d) Amplitud y duración de la carga sísmica

Si el suelo presenta condiciones favorables para la licuefacción, para activarse debe ocurrir un esfuerzo o sollicitación externa que desencadene el fenómeno. Las cargas violentas son más favorables a causar fallas y colapsos. Al incrementarse la intensidad rápidamente, el suelo no tiene tiempo para drenar y reducir las presiones internas que desestabilizan su estructura.

e) Historia previa de deformaciones y esfuerzos

Finn, Bransby y Pickering (1970) señalaron, que las características del fenómeno de licuación son influenciadas por la historia previa de deformaciones, los de ensayos con modelaciones de arena que se sometieron previamente a una serie de vibraciones de pequeña amplitud, permitieron a Seed, Mori y Chan (1975) verificar que por efecto de la historia sísmica se incrementa considerablemente la resistencia a la licuación (Mussio, 2012), estos resultados se muestran en la Figura 22.

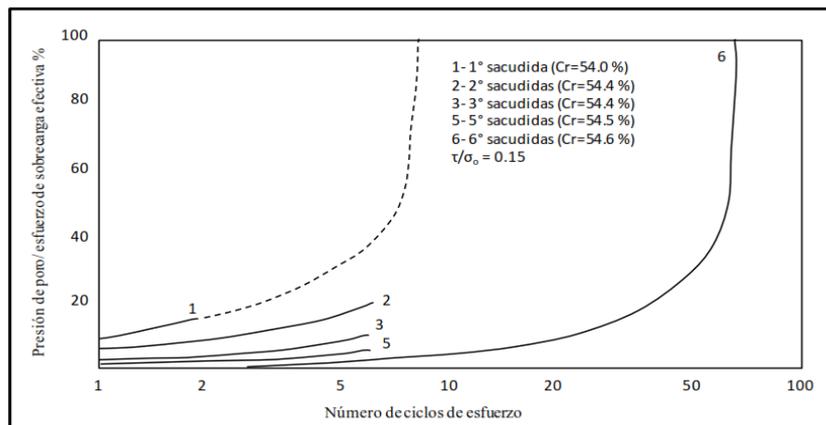


Figura 22. Efecto de la historia sísmica sobre la licuefacción de suelos.  
Fuente: Mussio, 2012.  
Elaboración: Los Autores.

#### 2.4.2.3.2. Efectos relacionados a la licuefacción.

Cuando ha ocurrido licuefacción existen diversos efectos que son observables o medibles, por lo general suelen estar relacionados daños y afectaciones de gran escala. Los efectos de la licuefacción se pueden agrupar en tres grandes categorías (Huang & Yu, 2017), descritas a continuación:

- Volcanes de arena

Es habitual que la licuefacción en estratos poco profundos se manifieste mediante la formación de bocas o grietas que expulsan agua y masa licuada hacia la superficie. Ocurren como una vía de escape que libera esfuerzos internos excesivos en la masa licuada a zonas de menor presión. Se pueden clasificar en dos grupos:

Volcanes de arena de cono plano: suelen aparecer solitarios o en grupo. En el 2003 el terremoto de Bachu, el diámetro típico de los volcanes de arena era entre 1 y 2 m, con el más grande hasta 3 m, sin sobresalir del suelo (Dong et al., 2010). En el terremoto de 2011 en Yingjiang, algunos lugares mostraron la formación de volcanes de arena agrupados con alturas de no más de 30 cm de sus conos y diámetros de 10 a 50 cm (Yao et al., 2011).

Volcanes de arena en grietas (Figura 23): Esta categoría se refiere a arenas que entran en erupción a través de grietas superficiales mientras se licúan. Las mezclas de agua y sedimentos expulsan rápida y violentamente a la superficie a través de grietas preexistentes inducidas por sacudidas sísmicas, como se vio en el terremoto de 2005 en Cachemira (Sahoo et al., 2007). Las grietas pueden llegar a medir hasta 10 m de longitud (Huang & Yu, 2017).



Figura 23. Volcán de arena a través de una grieta preexistente.

Fuente: Huang & Yu, 2017.  
Elaboración: Los Autores.

- Desplazamientos laterales

Los desplazamientos laterales del suelo (Figura 24) son deformaciones permanentes inducidos por la licuefacción. Es usual que los estratos inferiores al estar saturados sean los que licuen, cuando se dan desplazamientos laterales involucra masas de suelo de los estratos superiores. Con pendientes planas la movilidad del flujo se complica, el suelo llega a oscilar sobre los estratos licuados de manera que se generan grietas de tracción y compresión en la superficie. En pendientes inclinadas el suelo produce fallas de flujo: los taludes se deslizan como un flujo que acarrea grandes masas de suelo por distancias de hasta kilómetros.



Figura 24. Desplazamiento lateral de terraplén. Capitol Interpretive Center (PEER 2001b).

Fuente: Huang & Yu, 2017.

Elaboración: Los Autores.

Cuando el suelo se comporta como un fluido su capacidad de soporte tiende a ser nula, así, cualquier infraestructura cimentada sobre el colapsa. Al anularse la capacidad de soporte se pueden generar dos efectos: que las infraestructuras, tanques, pozos y tuberías floten sobre la superficie licuada, o que se produzca asentamientos diferenciales (Figura 24): los asentamientos observados pueden ser leves y no producir daños o pueden ser severos que causan hundimientos desde centímetros hasta metros.

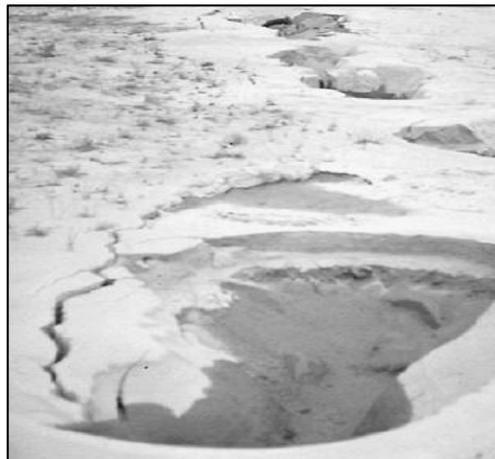


Figura 25. Asentamientos por licuefacción en Niigata – Japón, 1964.

Fuente: Mussio, 2012.

Elaboración: Los Autores.

- Fisuras en el suelo

Las fisuras o grietas en el suelo son comunes en la mayoría de sismos. De acuerdo a encuestas de campo después del terremoto de de Wenchuan de 2008 se reportaron la formación de grietas en el suelo en un 70-80% de los sitios donde hubo licuefacción, con longitudes entre decenas y miles de metros (Chen et al., 2009). En el sismo de Yingjiang de 2011, las grietas se expandieron por toda la población que llegaron a afectar la mayoría de las edificaciones y diques existentes; la más notable fue el agrietamiento en el Dique Yingjiang de 19 km de longitud y 1 m de profundidad según Yao et al. (2011). La Figura 26 muestra algunas de las grietas observadas en el sismo de Grecia en el año 2008.



Figura 26. Grietas observadas con expulsión de arena. Grecia, 2008.  
Fuente: Huang & Yu, 2017.  
Elaboración: Los Autores.

### 2.4.3. Evaluación del potencial de licuefacción.

El análisis íntegro del potencial de licuefacción, como se mencionó en la sección 2.4.1.3 de “Enfoques de Estudio al Fenómeno”, es uno de los objetivos más difíciles de lograr: la mayoría de métodos empleados en la actualidad están basados en el trabajo pionero de los investigadores Seed & Idriss (1971), que formularon un “Procedimiento simplificado para evaluar el potencial de licuefacción”. Así, el procedimiento original para evaluar la susceptibilidad de los suelos con el paso el tiempo se ha mejorado y complementado sin sufrir cambios sustanciales en sus planteamientos iniciales. Y esto implica que no se puede contrastar los resultados obtenidos si no con el propio procedimiento o con otros que no están suficientemente validados o extendidos.

Youd & Idriss (2001) mencionan limitaciones que implica el uso del proceso simplificado para evaluar la licuefacción: está desarrollado mediante evaluaciones empíricas de observaciones in situ y en datos de ensayos de campo y de laboratorio. Las pruebas de campo consistían en observaciones superficiales de sitios donde se registró licuefacción: volcanes de arena, grietas en el suelo o desplazamientos laterales. Los datos fueron recolectados en su mayor

parte desde sitios de superficiales, de pendiente suave, sustentados por sedimentos aluviales o fluviales a profundidades bajas (<15 m).

A pesar de ser una metodología semicuantitativa, los resultados de su aplicación son generalmente aceptados y el “procedimiento simplificado para evaluar el potencial de licuefacción” se ha convertido en la práctica estándar en mayor parte del mundo. La evaluación del potencial de licuefacción mediante el procedimiento simplificado se basa en el cálculo de dos variables: CSR y CRR, a continuación, se describe sus principales características:

- Relación de esfuerzos cíclicos (CSR)

La relación de esfuerzos cíclicos (Cyclic Stress Ratio) corresponde a la sollicitación que la carga sísmica genera sobre la masa de suelo. Seed & Idriss (1971) formularon la siguiente ecuación para calcular la relación de esfuerzos cíclicos:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (\text{Ec. 31})$$

En donde  $a_{max}$  es la aceleración máxima horizontal generada por el sismo;  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\sigma_{vo}$  y  $\sigma'_{vo}$  son los esfuerzos confinantes verticales total y efectivo respectivamente; y  $r_d$  es un coeficiente de reducción de esfuerzos para considerar la profundidad de la columna de suelo. Este último coeficiente ha sido fuente de diversos análisis y contradicciones; pues un método eficiente para establecerlo aún no se ha estandarizado. Los autores Youd T. L. & Idriss I. M., (2001) recomiendan usar las siguientes ecuaciones:

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad \text{para } z \leq 9.15 \text{ m} \quad (\text{Ec. 32})$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{para } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \quad (\text{Ec. 33})$$

Donde  $z$  es la profundidad medido desde la superficie, en metros.

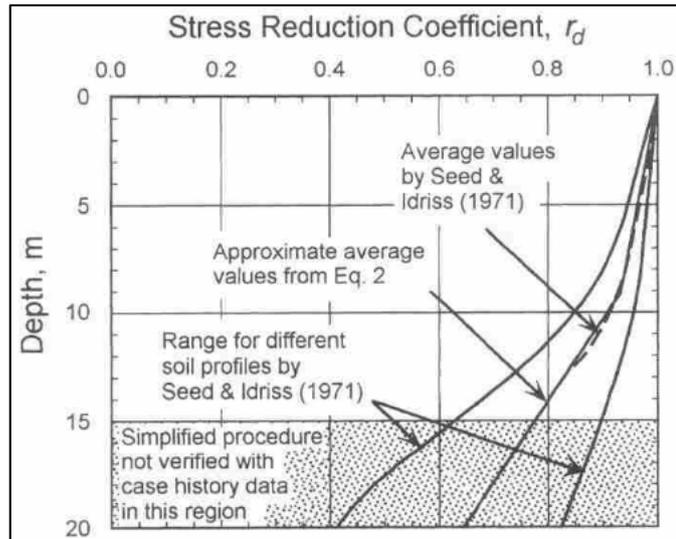


Figura 27. Factor  $r_d$  en función de la profundidad según las metodologías de Seed e Idriss (1971).

Fuente: Youd T. L. & Idriss I. M., 2001.

Elaboración: Los Autores.

Algunos investigadores sugieren varias ecuaciones para determinar el valor de  $r_d$ , sin embargo, “el procedimiento simplificado” no está validado para profundidades superiores a 15m; así, su aplicación resultaría en un análisis con demasiadas incertidumbres. En la Figura 27 se muestra los valores de  $r_d$ .

- Relación de resistencia cíclica (CRR)

La relación de resistencia cíclica (Cyclic Resistance Ratio) es la variable que mide la capacidad de un suelo a resistir la ocurrencia de licuefacción. El cálculo de este parámetro es el que mayor discusión genera: existen diversos procedimientos que se pueden aplicar, cada uno con ventajas y desventajas, donde el criterio del investigador prevalece. Se pueden agrupar en dos métodos que son los ensayos de laboratorio y ensayos de campo.

Para calcular el valor del CRR con ensayos de laboratorio se requieren muestras inalteradas del suelo en análisis, puesto que hay un mejor control de las condiciones de borde (intensidad de carga, velocidad de carga, confinamiento inicial, entre otros) la confiabilidad de los resultados obtenidos es alta. El inconveniente de los ensayos de laboratorio surge en el momento de obtener las muestras: suelos pocos cohesivos son altamente complicados de extraer sin perturbar su configuración inicial o de replicar en laboratorio su constitución natural. El método de extracción de muestras de suelo congeladas con nitrógeno líquido resulta demasiado costoso, aplicable únicamente para proyectos críticos de gran magnitud.

La alternativa que se ha extendido y son rutinarias para el cálculo del CRR, son los ensayos de campo. Los métodos más empleados son el ensayo de penetración estándar (SPT) y el ensayo de penetración con cono (CPT) debido a que disponen de un gran respaldo

investigativo, bases de datos y experiencia de campo en proyectos importantes que se han construido. Otros métodos que suelen aplicarse son el ensayo de penetración de Becker (BPT) y la medición de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) (Youd T. L. & Idriss I. M., 2001). Una comparativa entre los métodos de cálculo del CRR se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de varios ensayos de campo para la evaluación de la resistencia a la licuefacción.

Característica	Tipo de ensayo			
	SPT	CPT	BTP	$V_s$
Historial de mediciones en sitios que han licuado	Abundante	Abundante	Limitado	Disperso
Comportamiento esfuerzo-deformación que influye en la prueba	Parcialmente drenado, grandes deformaciones	Drenado, grandes deformaciones	Pequeñas deformaciones	Parcialmente drenado, grandes deformaciones
Control de calidad y repetitividad	De pobre a bueno	Muy bueno	Bueno	Pobre
Detección de la variabilidad de los depósitos de suelos	Eficiente en muestreos cercanos	Muy eficiente	Normal	Normal
Tipos de suelos en que se lo recomienda	Sin grava	Sin grava	Todos	Principalmente gravas
Recuperación de la muestra de suelo	Si	No	No	No
Medición de un índice o de una propiedad ingenieril	Índice	Índice	Ingenieril	Índice

Fuente: Youd T. L. & Idriss I. M., 2001.

Elaboración: Los Autores.

#### **2.4.3.1. Medición del potencial.**

Como se explicó anteriormente, los ensayos de campo son el procedimiento estandarizado para medir el potencial de licuefacción de un suelo para fines prácticos. Estos se usan para establecer factores de seguridad en construcciones, evaluación suelos y las acciones de mitigación que se deban tomar frente a este fenómeno.

Los ensayos con modelaciones experimentales de laboratorio son empleados para análisis e investigación teórica y algunos de ellos empleados en la determinación directa del potencial de licuefacción. Entre los principales ensayos experimentales están el método de columna resonante, triaxial dinámico, ensayo de esfuerzos de corte simple, mesa vibratoria y ensayos en centrífuga.

##### **2.4.3.1.1. Evaluación preliminar de susceptibilidad.**

El primer paso en la evaluación del potencial de licuefacción será medir la susceptibilidad a generar licuefacción cuando se presentan sollicitaciones de carga.

Seed e Idriss (1982) y Wang (1980) establecieron las características principales de un suelo susceptible a comportarse como un flujo:

- Arcilla fina < 15% (<0.005 mm)

- Limite líquido < 35%
- Contenido de agua in situ ≥ 90% del límite líquido.

El código de diseño sísmico de infraestructuras (Ministerio de la construcción de China, 2010) establece que si un suelo cumple alguna de las siguientes condiciones, este puede catalogarse como no licuable (Huang & Yu, 2017):

- Sismos actuantes de intensidad VII y VIII en suelos de la edad geológica de Pleistoceno Cuaternario y anterior.
- Sismos actuantes de intensidad VII, VIII y IX en suelos con contenido de arcilla (<0.005mm) en un porcentaje superior a 10, 13 y 16%.

Una vez se ha evaluado la probabilidad de un suelo a desarrollar licuefacción, los procedimientos para determinar la magnitud del potencial se explican a continuación.

#### 2.4.3.1.2. Ensayos de campo.

##### a) Corrección por magnitud del sismo en ensayos SPT Y CPT.

El parámetro CRR planteado por Seed e Idriss (1971) aplica para sismos de magnitud 7.5. Por lo tanto, los mismos autores en el año 1982, plantearon el Factor de Escala de Magnitud (MSF):

$$CSR_{M=7.5} = 0.65 \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{r_d}{MSF} \quad \text{donde: } MSF = 1 \quad (\text{Ec. 34})$$

Yout et al. (2001) propusieron la Ecuación 35 para obtener el valor de MSF; mientras Andrus & Stoke (1997) la Ecuación 36:

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^2} \quad (\text{Ec. 35})$$

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^{-2.56} \quad (\text{Ec. 36})$$

##### b) Evaluación mediante ensayo SPT.

El ensayo SPT se usa para evaluar el potencial de licuefacción, densidad relativa del suelo y asentamientos por licuefacción. Seed & Idriss (1971) fueron los primeros en proponer el uso de este ensayo, posteriormente varios investigadores se unieron a este mismo criterio. La ecuación que permite calcular el CRR mediante ensayos de SPT fue obtenida por la observación de múltiples casos históricos de generación de licuefacción por acción de sismos.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60cs}]^2} - \frac{1}{200} \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde, N corresponde al número de golpes en el ensayo SPT. Seed e Idriss (1982) observaron que el valor de N debe ser corregido para considerar los esfuerzos efectivos de confinamiento y contenido de finos.

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \quad (\text{Ec. 38})$$

$$\begin{cases} C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} & \sigma'_{vo} \leq 200 \text{ kPa} \\ C_N = \frac{2.2}{\left( 1.2 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a} \right)} & \sigma'_{vo} > 200 \text{ kPa} \end{cases} \quad (\text{Ec. 39})$$

Donde  $(N_1)_{60}$  es el conteo de golpes corregido por esfuerzos de confinamiento.  $N_m$  es el conteo de golpes antes de la corrección.  $P_a$  es  $\approx 100$  kPa (1 atm).

El registro histórico de sismos que se empleó para generar la Ecuación 37, se muestran en la Figura 28.

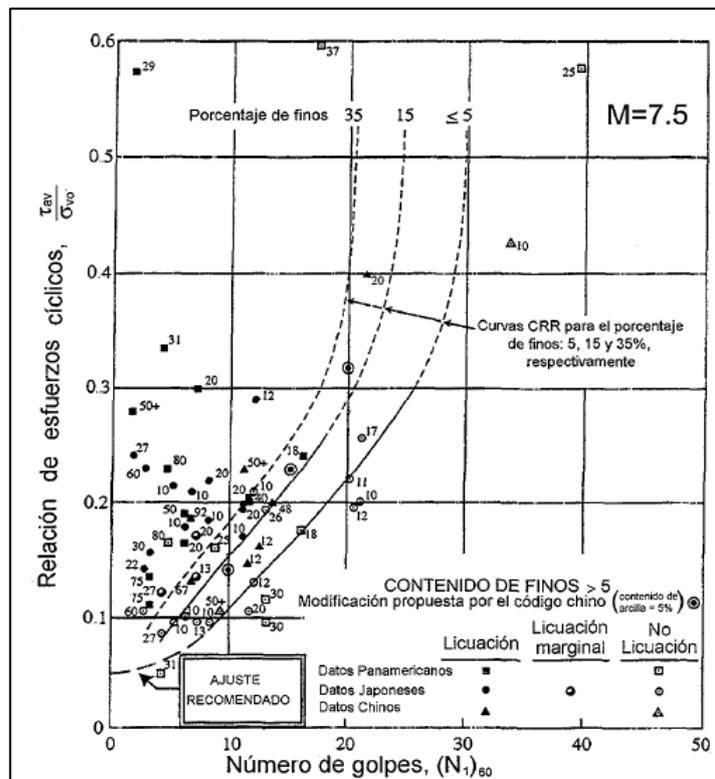


Figura 28. Relación entre el número de golpes y la relación de esfuerzos cíclicos para sismos de magnitud 7.5.

Fuente: Youd, Idriss & co-autores, 2001.

Elaboración: Los Autores.

### c) Evaluación mediante ensayo CPT.

Se usa típicamente en suelos suaves, arenas, limos, arenas y arenas con poco contenido de gravas. Este método no se puede aplicar a gravas a arenas muy densas. Los resultados al emplear este método son más consistentes y repetibles, permite un conocimiento más detallado de los estratos de suelo analizados (Huang & Yu, 2017). El parámetro de CRR se calcula con ensayos CPT mediante la fórmula:

$$CRR_{7.5} = \begin{cases} 0.833 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.05 & (q_{c1N})_{cs} < 50 \\ 93 \left[ \frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 & 50 < (q_{c1N})_{cs} \leq 160 \end{cases} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde  $(q_{c1N})_{cs}$  es la resistencia a la penetración en arena limpia normalizada a  $\sim 100$  kPa . Este parámetro se calcula con la fórmula:

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c \cdot q_{1N} \quad (\text{Ec. 41})$$

Y;

$$K_c = \begin{cases} 0 & I_c \leq 1.6 \\ -0.403I_c^4 + 5.58I_c^3 - 21.63I_c^2 + 33.75I_c - 17.88 & I_c > 1.6 \end{cases} \quad (\text{Ec. 42})$$

Donde  $K_c$  es un factor de corrección por las características del grano;  $C_o$  factor de normalización de la resistencia a la penetración con cono;  $q_c$  resultado de la medición en campo de la resistencia a la penetración con cono;  $n$  es un exponente que varía de 0.5 a 1.0 según el tipo de suelo; y el factor  $I_c$  depende del índice de comportamiento de suelo especificado en la Tabla 7.

Tabla 7. Límites de comportamiento de algunos tipos de suelo. Robertson y Wride (1998)

Índice de comportamiento del suelo, $I_c$	Tipo de conformación del suelo
$I_c < 1.31$	De arena con grava a arena densa
$1.31 < I_c < 2.05$	Arenas: arena limpia a arena limosa
$2.05 < I_c < 2.60$	Mezclas de arena: arena limosa a limo arenoso
$2.60 < I_c < 2.95$	Mezclas de limos: limos arcillosos a arcillas limosas
$2.95 < I_c < 3.60$	Arcillas: arcilla limosa a arcilla
$I_c > 3.60$	Suelos orgánicos: turba

Fuente: Huang & Yu, 2017.

Elaboración: Los Autores.

#### d) Evaluación mediante ensayo BTP.

El ensayo de BTP por lo general no suele emplearse para medir el potencial de licuefacción debido a que se enfoca a suelos con grava, y la investigación de la licuefacción en estas condiciones no está suficientemente desarrollada. El potencial de licuefacción se expresa como  $P_L$ . La magnitud del potencial de licuefacción se establece en la Tabla 8.

$$P_L = \int_0^H (1 - F_L(z)) \cdot w(z) dz \quad (\text{Ec. 43})$$

$$I_{le} = \sum_{i=1}^n (1 - F_{lei}) \cdot d_i \cdot W_i \quad (\text{Ec. 44})$$

Donde  $F_L(z)$  y  $F_{lei}$  son los factores de seguridad para la profundidad que pueden ser obtenidos de los ensayos SPT, CPT, BTP o  $V_s$ .

$w(z)$  está en función del peso, para  $0 \text{ m} < z < 10 \text{ m}$ ;  $w(z) = 10$ ; para  $10 \text{ m} < z < 20 \text{ m}$ ;  $w(z) = 10 - 0,5z$ . El factor  $d_i$  es la altura del estrato licuado en metros;  $w_i$  está en función del peso: para  $0 \text{ m} < z < 5 \text{ m}$ ;  $w(z) = 10$ ; para  $10 \text{ m} < z < 20 \text{ m}$ ;  $w(z) = \frac{(40 - 2Z)}{3}$ .

Tabla 8. Evaluación del potencial de licuefacción (Japan Road Association 2002).

Peligrosidad de licuefacción	Valor (Ec. 43)	Valor (Ec. 44)
Licuefacción leve	$P_L \leq 5$	$I_{le} \leq 6$
Licuefacción media	$6 < P_L \leq 20$	$6 < I_{le} \leq 18$
Licuefacción severa	$P_L > 20$	$I_{le} > 18$

Fuente: Huang & Yu, 2017.  
Elaboración: Los Autores.

#### e) Medición mediante la velocidad de onda de corte $V_s$ .

Desarrollado por Andrus y Stoke (1997), este método no perturba la masa de suelo. Los autores se basaron en el análisis del envío y recepción de diversas ondas de corte en los suelos estudiados. Su uso es altamente ventajoso puesto que suelos muy densos o muy sueltos pueden ser analizados sin inconveniente, además de poder registrar la respuesta dinámica de esfuerzo – deformación de la estructura del suelo. La ecuación para encontrar el CRR es la siguiente:

$$V_{s1} = V_s \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.25} \quad (\text{Ec. 45})$$

Donde  $V_{s1}$  es un factor de corrección la velocidad de onda de corte en suelos sobre-consolidados.

$$CRR = a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V_{s1}^* - V_{s1}} - \frac{1}{V_{s1}^*} \right) \quad (\text{Ec. 46})$$

$P_a$  es la presión atmosférica = 100 kPa;  $\sigma'_{vo}$  es el confinamiento efectivo inicial y  $V_{s1}^*$  es el una limitación del valor superior de  $V_{s1}$  que se obtiene de la siguiente ecuación:

$$V_{s1}^* = \begin{cases} 215 & F_c \leq 5\% \\ -0.75F_c + 218.75 & 5\% \leq F_c < 35\% \\ 200 & 35\% \leq F_c \end{cases} \quad (\text{Ec. 47})$$

#### 2.4.3.1.3. Ensayos de laboratorio

Se emplea muestras de suelo inalteradas o remodeladas, a las que se aplican cargas dinámicas para observar el comportamiento del suelo en el tiempo a través de la medición de sus características dinámicas, como el módulo de amortiguamiento, resistencia dinámica y capacidad de soporte. El objetivo de estos métodos está orientado a registrar la variación de los esfuerzos internos generados, deformaciones y el incremento de presión de la presión de poros que conllevan a la licuefacción de suelos (Huang & Yu, 2017).

La amplitud de la deformación por corte (Georgiannou, Rampello, & Silvestri, 1991) permite identificar tres estados en una muestra de suelo afectada por cargas dinámicas: el estado plástico delimitado por deformaciones entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$ , estado elasto-plástico para el rango de  $10^{-4}$  a  $10^{-2}$  y un estado de daño estructural si la amplitud de deformación es mayor a  $10^{-2}$ .

#### a) Ensayo triaxial dinámico.

El método se aplica por lo general a suelos no cohesivos con drenaje libre y alta permeabilidad. Es un ensayo destructivo en donde el límite de falla se define por la cantidad de ciclos requeridos para alcanzar el límite de deformación o un 100 % de relación de presión de poro. La resistencia cíclica de un suelo se evalúa respecto a la variación de la deformación axial, magnitud del esfuerzo cíclico aplicado, número de ciclos aplicados, variación del exceso de presión de poro, del esfuerzo efectivo, entre otros. El ensayo triaxial cíclico se realiza bajo condiciones no drenadas para simular las condiciones de campo durante sismos o cargas cíclicas. Es recomendable emplear muestras inalteradas pues diferentes métodos han demostrado que muestras reconstituidas con la misma densidad pueden alcanzar diferentes resistencias cíclicas, la resistencia casi siempre será mayor en muestras inalteradas (American Society for Testing and Materials, 2004).

- Principios del ensayo

El ensayo busca representar las condiciones naturales de esfuerzos en los suelos bajo cargas dinámicas. La muestra de suelo en un ensayo triaxial cíclico resiste los esfuerzos mostrados en la Figura 29. El primer paso es la aplicación de un esfuerzo de confinamiento en la célula que rodea la muestra  $\sigma_c$  aplicada en todas las direcciones (condición isotrópica). Luego de la etapa de confinamiento se suma un esfuerzo desviador periódico  $+\sigma_d$  o también denominado  $q$  mediante la excitación del dispositivo, esto genera una deformación axial  $\varepsilon_a$ . Como la presión en la célula se mantiene constante el esfuerzo desviador periódico  $+\sigma_d/2$  es aplicado a 45° en el plano de la muestra de suelo (Rees, 2013).

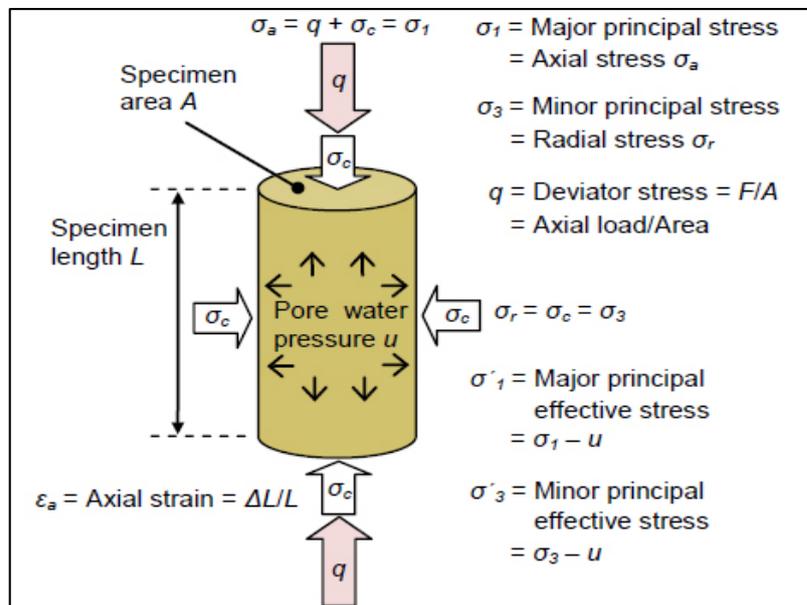


Figura 29. Esfuerzos de compresión durante el ensayo triaxial cíclico.  
Fuente: Rees, 2013.  
Elaboración: Los Autores.

- Criterios de evaluación del potencial

Al desarrollar el ensayo, la normativa ASTM D 5311 recomienda garantizar que el equipo transmita una carga sinusoidal uniforme en el rango de 0.1 a 2 Hz y que el dispositivo de carga mantenga una aplicación de cargas cíclicas uniformes hasta un 20 % de deformación de doble amplitud en la muestra. El equipo debe ser capaz de registrar la deformación axial con precisión de  $\pm 0.02\%$  la altura inicial de la muestra y el registro de la presión de poro con precisión de  $\pm 2 \text{ kPa}$ .

El ensayo durará hasta que se cumpla alguna de las siguientes condiciones: la deformación de doble amplitud (diferencia entre la máxima deformación simple por compresión y la máxima deformación simple por tensión) exceda el 20 %, la deformación única por compresión o

alargamiento exceda el 20 %, en el instante que se supere los 500 ciclos de carga o la onda de carga se deteriore en exceso. Los datos a registrar serán, versus el número de ciclos (N): deformación de doble amplitud, deformación por compresión y alargamiento, esfuerzos pico de máxima amplitud, esfuerzo pico por compresión y alargamiento, relación de presión de poro y exceso de presión de poro máximo registrado por acción de la carga cíclica (American Society for Testing and Materials, 2004).

La evaluación del potencial compara la resistencia cíclica de la muestra de suelo y la carga de sismo de naturaleza irregular, convertida a un esfuerzo de corte cíclico equivalente. Un proceso simplificado para obtener dicho esfuerzo de corte cíclico al emplear datos de campo fue propuesto por Seed, Idriss, & Arango (1983), mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_{av} = 0.65 \cdot z \cdot \gamma \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot \gamma_d \quad \gamma_d = 1 - 0.0133 \cdot z \quad (\text{Ec. 48})$$

En donde  $\tau_{av}$  es el esfuerzo de corte equivalente en  $kPa$ ,  $\gamma$  es peso unitario del suelo en  $kN / m^3$ ,  $a_{\max}$  es la aceleración pico del suelo (PGA) en  $m / s^2$ ,  $z$  la profundidad (m) y  $\gamma_d$  factor de reducción del esfuerzo en función de la profundidad.

La resistencia a la licuefacción según Huang & Yu (2017) se puede determinar mediante:

$$\tau_d = C_r \cdot \left( \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} \right)_{N_f} \cdot \sigma'_v \quad (\text{Ec. 49})$$

En donde  $\left( \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} \right)_{N_f}$  es la relación de esfuerzos de licuefacción del suelo determinado en el ensayo triaxial cíclico;  $C_r$  un factor de corrección de la relación de esfuerzos de licuefacción del suelo,  $\sigma'_v$  es la presión de confinamiento efectivo en  $kPa$ .

Se dice que un suelo es licuable si se cumple que:

$$\tau_{av} > \tau_d \quad (\text{Ec. 50})$$

### **b) Ensayo de corte simple cíclico**

El triaxial cíclico está ampliamente difundido y las investigaciones ligadas a la medición del potencial de licuefacción son diversas, sin embargo, el ensayo de corte simple cíclico posee ciertas ventajas al representar de mejor manera las condiciones naturales de esfuerzos in situ que lo hacen atractivo en el estudio de la licuefacción. El inconveniente de este ensayo es la existencia de pocas investigaciones que lo emplean, particularmente para condiciones críticas o arenas sueltas (Jefferies & Been, 2015).

- Principios del ensayo

Se emplea muestras remoldeadas o inalteradas, principalmente para obtener el módulo de corte y la relación de amortiguamiento de una muestra de suelo. La carga horizontal aplicada, necesaria para deformar el espécimen, es medida por una célula de carga y la deformación es medida por un transformador lineal variable. Durante el ensayo, el espécimen es consolidado por un esfuerzo vertical  $\sigma_v$ , simultáneamente el esfuerzo lateral será igual a  $k_o \cdot \sigma_v$ , donde  $k_o$  es el coeficiente de presión del suelo en reposo. La Figura 30 muestra los esfuerzos generados en el espécimen luego de aplicarse la carga de esfuerzo cíclica horizontal (en condiciones no drenadas). La variación de la presión de poro y la deformación de corte son registradas en función del número de ciclos de carga horizontal aplicados. (Das & Ramana, 2010)

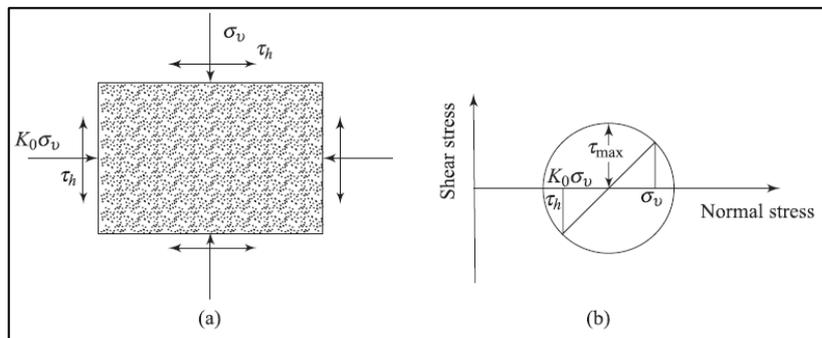


Figura 30. Ensayo de corte simple cíclico.

Fuente: Das & Ramana, 2010.

Elaboración: Los Autores.

El esfuerzo máximo de corte, que es superior al aplicado, en el espécimen puede calcularse como:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\tau_h^2 + \left[ \frac{\sigma_v}{2} \cdot (1 - k_o) \right]^2} \quad (\text{Ec. 51})$$

- Resultados característicos

Si bien el ensayo posee limitaciones: al dificultarse la medición de los esfuerzos en los bordes de la muestra y tener un registro consistente únicamente del tercio medio, este ha sido desplazado como ensayo habitual en la medición y caracterización de suelos, dándole prioridad al ensayo triaxial. Debe mencionarse, sin embargo, que los resultados obtenidos son ampliamente consistentes con los esperados en campo, además, el desempeño del ensayo puede mejorarse al emplear equipos modernos controlados por software informático, estos equipos emplean como membrana de confinamiento del espécimen elementos de paredes metálicas forradas con polímeros y logran una mayor precisión en los datos registrados (Jefferies & Been, 2015).

En la Figura 31 se muestra los resultados obtenidos mediante el ensayo de corte simple cíclico en los estudios de Peacock & Seed (1968) en el estudio la licuefacción inicial aplicado a arenas de Monterrey.

La determinación del potencial de licuefacción procede de la misma manera que el ensayo triaxial cíclico, en donde, la resistencia cíclica de la muestra de suelo registrada durante el ensayo de corte simple se evalúa respecto al esfuerzo cíclico equivalente de un sismo.

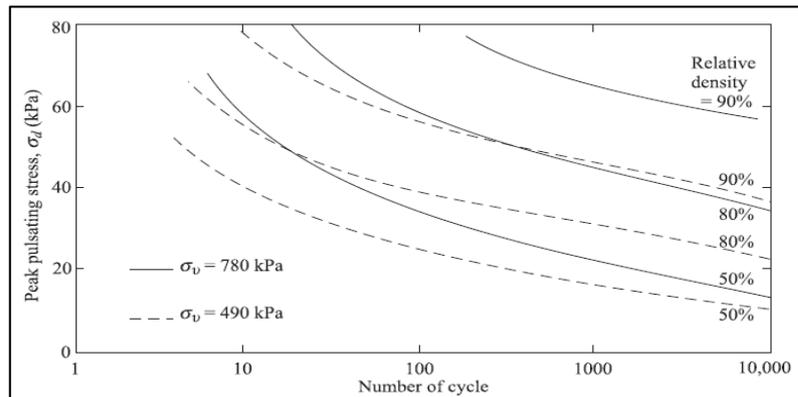


Figura 31. Licuefacción inicial con ensayo de corte simple cíclico, arenas de Monterrey (Peacock & Seed 1968).  
Fuente: Jefferies & Been, 2015.  
Elaboración: Los Autores.

El uso del ensayo de corte simple cíclico tiene las ventajas de recrear con mayor aproximación las condiciones in situ, se emplea equipos sencillos, fáciles de operar y, principalmente, es un ensayo que permite registrar la deformación de una muestra de suelo en un amplio rango de valores, desde 10-2 hasta cerca de 5 % usual en registros sísmicos, característica que por ejemplo el ensayo de columna resonante no posee (Das & Ramana, 2010).

### c) Ensayo de columna resonante

El ensayo de columna resonante se basa en la excitación de una columna de suelo en uno de sus modos naturales de vibración, al conocer su frecuencia de resonancia se puede determinar su velocidad de onda de corte. En este ensayo puede aplicarse excitación tanto longitudinal como torsional que generan velocidades de onda longitudinales  $v_s$  y velocidades de onda de corte  $v_c$  respectivamente (Das & Ramana, 2010). Las condiciones in situ de un suelo son determinantes en la respuesta dinámica que presentan a cargas cíclicas o de sismos, tales como la densidad relativa, saturación, relación de amortiguamiento o módulo de corte, entre otros. Por lo tanto, según (American Society for Testing and Materials, 2011), la eficiencia en la determinación de estos métodos, dependen de la técnicas empleadas para simular las condiciones de campo, relacionadas a los esfuerzos efectivos in situ, la relación de vacíos del suelo, temperatura, etc.; y, de igual manera a la amplitud de vibración aplicada,

el control de los esfuerzos generados y la precisión de los equipos empleados para registrar los resultados.

- Principios del ensayo

Se emplea muestras cilíndricas de suelo, las que pueden ser inalteradas o remodeladas. El ensayo se basa en la determinación parámetros dinámicos del suelo, como el módulo de corte, relación de amortiguamiento o módulo de Young, mediante la excitación de una de las bases de la muestra. El ensayo también permite evaluar la respuesta de la columna resonante para algunas condiciones controladas como el exceso de presión de poro o grado de saturación, que resulta favorable para la medición del potencial de licuefacción en los suelos.

El ensayo de columna resonante es considerado como un método no destructivo: el rango de medición de la amplitud de deformación por las vibraciones aplicadas está entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  (Huang & Yu, 2017).

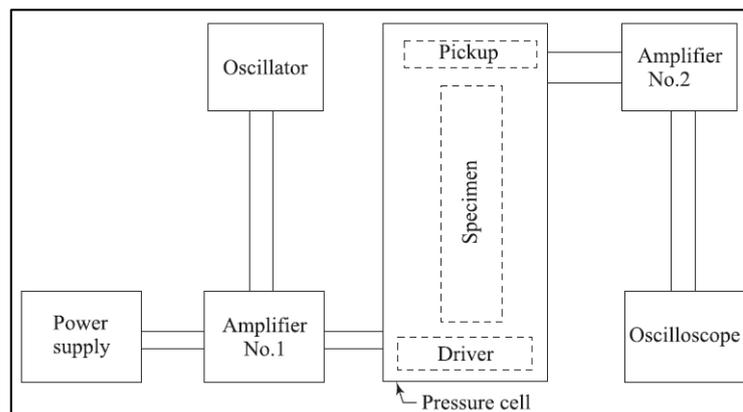


Figura 32. Esquema del aparato de columna resonante.  
Fuente: Das & Ramana, 2010.  
Elaboración: Los Autores.

La Figura 32 muestra el esquema del equipo empleado para el ensayo de columna resonante. Durante el ensayo, la muestra es sellada por una membrana de polímero y puesta en una cámara triaxial para lograr la consolidación de la misma. Luego de la consolidación, la muestra saturada es afectada por las cargas axiales sinusoidales que ejerce la placa superior del equipo, los datos registrados son la deformación axial y el incremento de la presión de poro a través del tiempo (American Society for Testing and Materials, 2011).

#### 2.4.3.1.4. Modelos físicos.

Los métodos de laboratorio anteriormente revisados son eficientes para determinar las propiedades dinámicas de un suelo al emplear pequeñas muestras de suelo. Los modelos físicos según Huang & Yu (2017) presentan mayores ventajas al tener un mayor control de las condiciones de borde y se logra una mejor representación de las condiciones in situ. Los ensayos típicamente empleados son de mesa vibratoria y centrífuga dinámica para el estudio

de suelos saturados y predecir las características dinámicas de la licuefacción de suelos, estos métodos están principalmente por la escala de las muestras y el control de los esfuerzos internos actuantes.

Los ensayos realizados con mesa vibratoria están bajo acción de la gravedad terrestre, mientras los ensayos en centrifuga están sometidos a fuerzas gravitatorias más altas, entre las ventajas que poseen se tiene la capacidad de sostener el ensayo aún a grandes rangos de amplitud en las deformaciones de las muestras, la posibilidad de medir la respuesta a esfuerzos aplicados en más de un eje, puede ser empleado para investigar los mecanismos de falla que generan licuefacción o si se emplea para validar modelos numéricos (Prasad, Towhata, Chandradhara, & Nanjundaswamy, 2004).

#### **a) Mesa vibratoria**

Los estudios del fenómeno de licuefacción que emplean el equipo de mesa vibratoria han dado una representación muy didáctica de la respuesta del suelo cuando se genera licuefacción, lo ilustrativo del ensayo ha permitido identificar las principales características desencadenantes del fenómeno y los efectos en el suelo afectado.

Prasad et al., (2004) establecieron una guía para los ensayos con mesa vibratoria, que menciona las limitaciones del ensayo al no establecer el potencial de licuefacción en función de relación de esfuerzos cíclicos (CSR) como los métodos más habituales usados en la evaluación. La resistencia a la licuefacción en arenas limosas afectadas por diferentes magnitudes de aceleración investigada por Sing et al. (2008) se basó en la medición de la presión de poros a través del tiempo. Este ensayo ha sido empleado mayormente para el estudio de la licuefacción completa del suelo, lo que deja de lado la fase de iniciación del fenómeno (Pathak, Dalvi, & Katdare, 2010).

- Características del ensayo

El diseño de la mesa vibratoria es uno de los factores más importantes para evaluar el potencial de licuefacción mediante este método. Una buena representación de los esfuerzos generados por sismos requiere un equipo de mesa vibratoria de seis grados de libertad. El sistema electro-hidráulico y mantenimiento requerido para un equipo de tales características sería altamente costoso y de compleja operación. Actualmente, es común el uso de mesas vibratorias de un solo grado de libertad: traslación horizontal y se ha observado que resulta ser suficiente para medir ciertas características dinámicas del suelo como la respuesta y mecanismos de falla en terraplenes, muros de contención, laderas, entre otros (Prasad et al., 2004).

La eficiencia del ensayo con mesa vibratoria se ha visto altamente potenciada por los dispositivos informáticos existentes, tanto para la medición de la respuesta como en el control de los esfuerzos aplicados al suelo ensayado, dado que en sus inicios era movida por acción manual sobre una superficie en rieles. La mesa vibratoria más grande se encuentra en Miki – Japón y es capaz de mover un edificio de 5 niveles equivalente a unas 1200 ton, sobre una plataforma de 15 x 20 m; se la conoce como E-Defense (Mendoza Herrera, 2014).

El equipo generalmente empleado para el ensayo tiene las características que se muestra en la Figura 33a, posee un motor de 3 H.P. de potencia, capaz de generar frecuencias de vibración entre 1 a 10 Hz, la plataforma tiene una superficie de 1000 x 1000 mm. La Figura 33b muestra un espécimen listo para ensayarse, este se contiene en recipiente de vidrio de 400 x 400 x 400 mm, la base se fija a la superficie de la plataforma.



Figura 33. Equipo de ensayo mesa vibratoria.  
Fuente: Pathak et al., 2010.  
Elaboración: Los Autores.

### **b) Ensayos en centrífuga**

Un equipo de centrífuga es un dispositivo que al girar crea fuerzas centrífugas sobre una muestra, el campo gravitatorio generado puede ser igual o superior al terrestre. En particular, las centrífugas geotécnicas usadas para modelar el comportamiento del suelo con un mayor control de los esfuerzos confinantes logran una representación altamente eficiente de las condiciones in situ del suelo. Por lo general, los dispositivos de centrífuga aplican fuerzas de aceleración a muestras de pequeña escala entre 30 y 200 g (Dobry & Liu, 1994).

- Principios del ensayo

Al considerar que la fuerza de inercia puede ser simulada por la acción de cargas gravitacionales, el ensayo con centrífuga dinámica determina las propiedades del suelo al modelar un campo gravitatorio que recrea las condiciones naturales de tensión y deformación en un espécimen a escala de suelo (Huang & Yu, 2017).

El ensayo se realiza en un dispositivo como el que se muestra en la Figura 34. Durante el mismo, mientras el brazo gira sobre su eje, la plataforma y el espécimen giran gradualmente 90° sobre las bisagras del brazo. Si se aplica un acelerograma como esfuerzo o carga horizontal se simula la acción de un sismo y es posible registrar la respuesta del suelo a tal actividad, según Dobry & Liu (1994); además que, al emplear muestras a pequeña escala con un buen control de las condiciones de contorno logra explicar de mejor manera el comportamiento complejo y no lineal del suelo, estos ensayos permiten entender los mecanismos básicos y la validación de métodos numéricos, aplicables a diversos campos, entre ellos, el estudio del fenómeno de licuefacción.

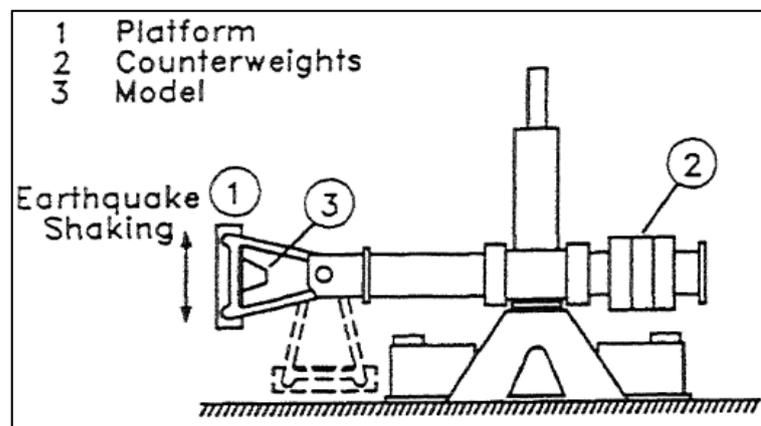


Figura 34. Esquema de equipo de centrífuga dinámica.  
 Fuente: Dobry & Liu, 1994.  
 Elaboración: Los Autores.

Este método para determinar el potencial de licuefacción muestra las características del ensayo de manera ilustrativa y eficiente. Jefferies & Been (2015) describen tres limitaciones al usar un dispositivo de centrífuga: las condiciones iniciales de la muestra pueden ser controladas fácilmente antes de la prueba pero no su variación durante la misma, el esfuerzo geostático horizontal que se genera en la muestra no puede ser medido; las condiciones de borde pese a controlarse de mejor manera, tienen la incertidumbre del escalado adecuado de la muestra y tiempo que se aplica la fuerza centrífuga, y por último, Jefferies et al. (1988) mencionan los modelos iniciales de predicción con este método como completamente erróneos. A pesar de estas consideraciones debe reconocerse como un método válido para proveer bases al aprendizaje y experiencias del fenómeno de licuefacción y otras características de los suelos.

#### 2.4.4. Mitigación del fenómeno de licuefacción.

La elección de un método para mitigar el efecto de la licuefacción requiere un previo conocimiento de la peligrosidad de licuar del sitio en análisis. Cuando se evalúa el potencial de licuefacción de un depósito es recomendable que dos o más metodologías se apliquen de tal forma que el fenómeno esté plenamente identificado. A partir de este conocimiento, es más

probable la elección de una técnica de mitigación acertada. En la ingeniería la aplicación de un proceso constructivo siempre está ligado a un análisis de la relación costo – beneficio. Al plantearse la mitigación del riesgo de licuar de un suelo, se debe considerar la importancia de la obra, la disponibilidad de materiales o equipos, efectividad del método elegido, costos de implementación, entre otros factores.

Las estrategias de mitigación, según Idriss & Boulanger (2008), pueden incluir:

- No hacer nada y aceptar riesgo y los posibles daños.
- Cambiar de proyecto o elegir otro sitio.
- Mejorar el terreno para que la posibilidad de daño sea aceptable.
- Modificar el diseño de la estructura para que la licuefacción no le afecte.

Lew, (1984) señala que las técnicas de mitigación se pueden dividir en dos grupos como se muestra en la Tabla 9:

Tabla 9. Métodos de mitigación del fenómeno de licuefacción.

<b>Métodos para mejorar el desempeño del suelo</b>
Drenado
Pozos de alivio (reducir la presión de poros)
Columnas de piedra (Vibro-reemplazamiento)
Excavación de suelos pobres y reemplazados con relleno compactado
Densificación in situ (Compactación dinámica, vibroflotación, pilotes de compactación)
Colocación de relleno adicional (incrementando la presión de confinamiento y rigidez)
<b>Métodos de reforzamiento estructural</b>
Conexión estructural más fuerte
Adición de vigas y vigas de lazo
Colocar pilotes soportados en suelos más estables.

Fuente: Lew, M., 1984.

Elaboración: Los Autores.

A continuación se describen brevemente los métodos más importantes:

#### **2.4.4.1. Vibrométodos.**

Son los métodos más empleados por ser los más económicos y efectivos. Una sonda vibratoria penetra el suelo y densifica el material contiguo. Se tiene tres principales variantes de aplicación, e incluyen: La vibro-barra que aplica una vibración vertical en la punta de barra de penetración, la vibro-flotación aplica un motor de vibración horizontal localizado en la punta de sonda de penetración y en el vibro-reemplazamiento (Figura 35): la sonda incluye una cavidad que permite importar material como roca triturada, grava, arena o concreto.

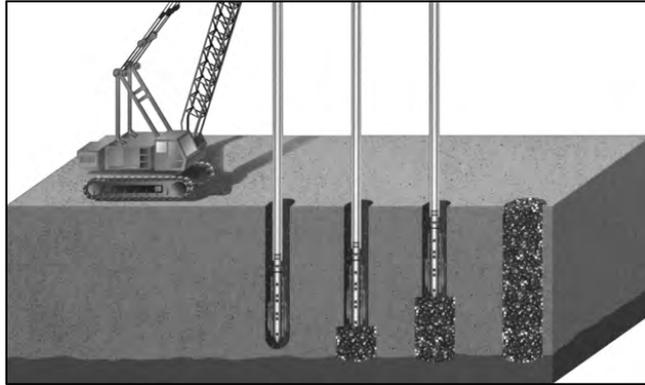


Figura 35. Proceso de vibro-reemplazamiento de una columna de suelo.

Fuente: Idriss & Boulanger, 2008.

Elaboración. Los Autores.

Estos son los métodos ampliamente usados por ser efectivos y económicos en la mayoría de escenarios. Sus limitaciones de aplicación son las siguientes: densificación de suelos con porcentaje de finos superior a 20%; pueden causar asentamientos y en la sonda pueden transportar contaminantes ambientales de un estrato a otro (Idriss & Boulanger, 2008).

#### **2.4.4.2. Compactación dinámica.**

Se basa en la aplicación de esfuerzos de confinamiento, una grúa deja caer una masa desde una elevada altura, típicamente, 33 ton desde una altura de 30 m, el proceso se muestra en la Figura 36.



Figura 36. Proceso de compactación dinámica.

Fuente: Idriss & Boulanger, 2008.

Elaboración. Los Autores.

Idriss & Boulanger (2008) señalan: a compactación dinámica profunda mejora los depósitos de suelo licuables principalmente mediante la densificación de los suelos in situ y el aumento

del estrés in situ. Las ventajas de la compactación dinámica profunda incluyen las siguientes: es relativamente económico en el tratamiento de grandes áreas bajo ciertas condiciones, el equipo y los procedimientos son relativamente simples, y no requiere la inserción de ningún equipo en el subsuelo.

#### **2.4.4.3. Inyección de compactación.**

Esta técnica es aplicable a terrenos granulares que son susceptibles a la licuefacción, no se recomienda para suelos arcillosos saturados ni limos. El proceso consiste en inyectar al estrato licuable un mortero seco de alta densidad que se expande de forma homogénea de tal forma que ayuda a compactar y desplazar el suelo periférico (Figura 37). El principal beneficio es que ayuda a tratar edificaciones ya construidas donde se ha detectado potencial de licuefacción (Polonio B. & Lindao B., 2014).

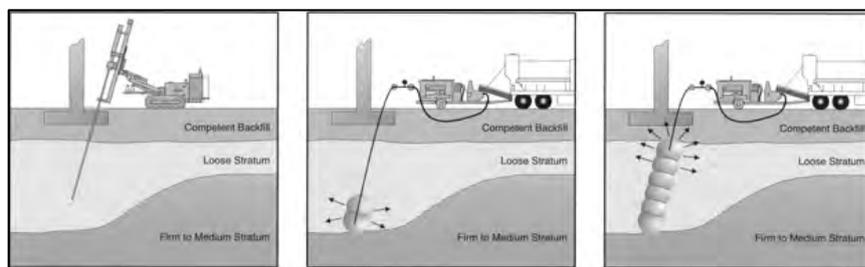


Figura 37. Inyección de material denso para lograr densificación del suelo.  
Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014.  
Elaboración. Los Autores.

#### **2.4.4.4. Jet Grouting.**

Este método consiste en un semi-reemplazo del suelo constituyente por columnas falsas: el suelo es inyectado con lechadas de cemento en chorros de aire a elevada presión (Figura 38). Este método también puede ser usado para construir en el suelo paredes o muros de corte. Una ventaja del Jet Grouting es su posibilidad de aplicación en arenas poco consolidadas, al incrementar su esfuerzo efectivo de confinamiento y otorgar mayor rigidez a arenas identificables como licuables de espesor limitado a profundidades elevadas.

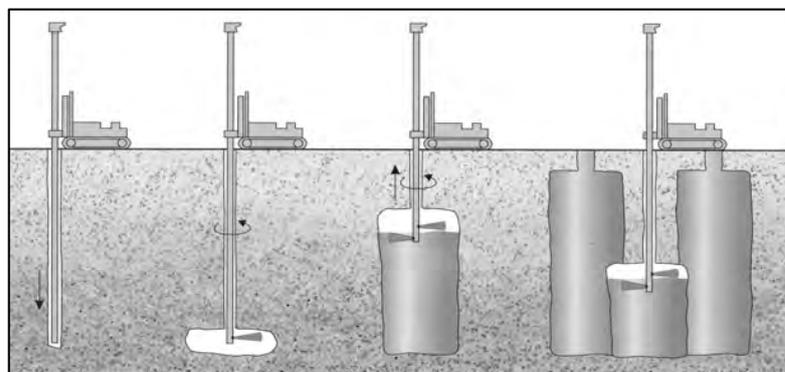


Figura 38. Aplicación de Jet Grouting para producir consolidación.  
Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014.  
Elaboración. Los Autores.

#### 2.4.4.5. Drenaje.

Los drenajes para mitigar la licuefacción se basan en la extracción del agua encerrada en la masa de suelo o proveer una vía de escape rápida cuando se produzcan excesos de presión interna (Figura 39). Los elementos empleados en este método incluyen: drenajes verticales distribuidos en patrones de líneas rectas, rejillas; para el drenado eficiente suele emplearse gravas o compuestos geosintéticos. Su efectividad es menor comparado con otros métodos más comunes, sin embargo, es una buena alternativa que requiere cuidado en su diseño para lograr un funcionamiento aceptable.

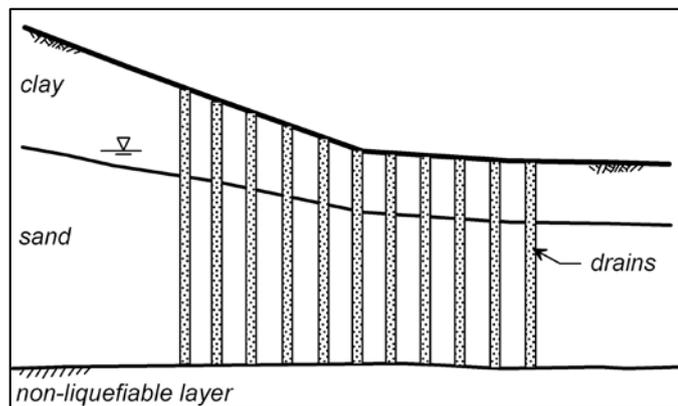


Figura 39. Distribución de drenes en un depósito de suelo.  
Fuente: Idriss & Boulanger, 2008.  
Elaboración. Los Autores.

#### 2.4.4.6. Remoción y reemplazo.

Es el método más simple dentro de la ingeniería para mejorar suelos, aplicable en muchos ámbitos como el control del riesgo de licuefacción de un suelo. Este método consiste en excavar y remover el suelo licuable para luego ser reemplazado por material compactado de mejor calidad (Figura 40). Las ventajas que posee es la economía que representa su aplicación si los depósitos licuables no son profundos. Los equipos están ampliamente disponibles y posee un alto grado de confianza por la facilidad de aplicar pruebas de calidad. Se recomienda analizar con detalle la factibilidad de la aplicación de este método, pues está limitado por el volumen a remover, el espacio disponible, el control de los niveles freáticos, edificaciones cercanas que puedan afectarse en sus cimentaciones, entre otros.

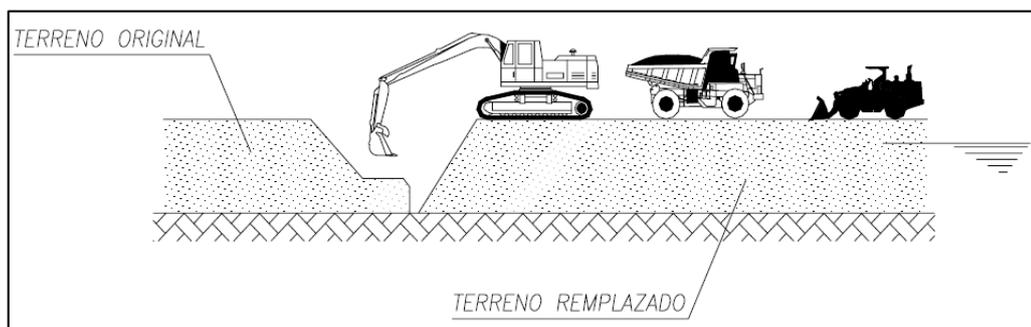


Figura 40. Excavación y reemplazo de material susceptible a licuefacción.  
Fuente: Polonio B. & Lindao B., 2014.  
Elaboración. Los Autores.

## **2.5. Métodos numéricos y el fenómeno de licuefacción.**

Zienkiewicz, Taylor, & Zhu (2013) expresan: las limitaciones de la mente humana son tales que no puede captar el comportamiento de sus creaciones y entornos complejos en una sola operación. El proceso de subdividir todos los sistemas en sus componentes individuales o "elementos" y luego reconstruir el sistema original de tales componentes unitarios para estudiar su comportamiento, es una manera natural en la que el ingeniero, el científico o incluso el economista prosigue dado que su comportamiento se entiende fácilmente.

En muchas ocasiones basta un número finito de elementos bien definidos para representar un modelo, en otros, la subdivisión en elementos unitarios se extiende indefinidamente y requieren ecuaciones diferenciales o estados equivalentes de infinitos elementos. En la actualidad, los métodos numéricos suelen simplificar las posibilidades de solución para tratar la extensa cantidad de información de los modelos complejos y, por lo general, su aproximación es bastante cercana a la solución del modelo complejo completo.

### **2.5.1. Historia.**

En los inicios del estudio extensivo de la licuefacción, el método predominante empleado por los investigadores se basó en la medición de esfuerzos cortantes que cargas dinámicas generan en una masa de suelo y la capacidad de ésta para asimilarlos, siempre limitados por la complejidad de evaluar las diversas variables intervinientes en el fenómeno y la interpretación integral de la respuesta del suelo. Los modelos de elementos finitos brindan la oportunidad de interpretar la licuefacción con modelos constitutivos de gran exactitud, que permiten registrar la variación de las características de un suelo licuado como los esfuerzos efectivos, incremento de presión de poro, relación de amortiguamiento, entre otros.

Un análisis satisfactorio por medio de elementos finitos de problemas de dinámica de suelos se ha logrado a través de representar la interacción entre las fases sólida y fluida de un suelo sometido a cargas dinámicas. Las ecuaciones que rigen la interacción entre elementos sólidos y fluidos fueron establecidas por primera vez para fenómenos cuasi – estáticos (Biot, 1841) y luego extendidas a la dinámica (Zienkiewicz, Chan, M. Pastor, & T. Shiomi, 1987).

En estos términos, la licuefacción ocurre por la interacción entre una fase sólida del suelo constituida por partículas de diferentes tamaños que conforman una estructura compresible y una fase líquida en la cual los espacios vacíos son ocupados y puede fluir a través de los poros. Biot (1941, 1962) describe esta interacción como un desplazamiento de la fase sólida y un desplazamiento relativo de la fase líquida, siendo la primera descripción completa para este modelo. En la fase sólida el comportamiento de la estructura del suelo fue limitado al tipo elástico – lineal y el flujo regido a las leyes de Darcy. Este estudio ha sido la base para los posteriores investigadores que han ampliado el alcance del mismo (Di & Sato, 2004).

El análisis de la licuefacción, según describe Di & Sato (2004), con el paso del tiempo ha ido ampliándose y perfeccionándose por diversas investigaciones: Zienkiewicz et al. (1980) y Prevost (1982) establecieron un método generalizado para la resolución de métodos finitos, la respuesta de materiales no lineales y bajo grandes esfuerzos fue investigado por Meroi et al. (1980) y Zienkiewicz et al. (1990). Oka et al., (1994) emplean un modelo combinado de elementos finitos y diferenciales finitas (FE – FD) para representar suelos saturados con tensiones infinitesimales; en la cual las ecuaciones de equilibrio de los suelos durante el análisis se resuelven a través de elementos finitos y la presión de poros se analiza mediante ecuaciones resueltas por diferenciales finitas, así, la respuesta final del análisis se logra con un menor número de grados de libertad y en una matriz de ecuaciones simétrica. El modelo de elementos finitos y diferenciales finitas fue propuesto por Akai y Tamura (1978). La investigación de Oka et al. (1994) logra una representación eficiente de estructuras de suelos afectados por sismos: su modelo constitutivo de elementos finitos emplea las teorías de elasto – plasticidad no asociativa y el endurecimiento lineal propuestos por Oka et al. (1992, 1999).

### **2.5.2. Modelos constitutivos.**

Los modelos constitutivos en la actualidad se basan en análisis elasto – plásticos para resolver problemas geotécnicos. Hay dos tipos de comportamiento no lineal que deben registrarse al analizar los suelos: de materiales de No-Linealidad, en la que la rigidez del suelo evoluciona con las deformaciones y materiales de No-Linealidad Geométrica, que se conoce como un análisis de 'deformaciones de gran amplitud' donde los términos residuales superiores del desplazamiento afectan a la solución.

Las ventajas de emplear modelos constitutivos de elementos finitos se pueden observar en la capacidad de representar los efectos reales y fallas generados en los ensayos realizados, los programas de elementos finitos (FE) permiten simplificar y graficar los mecanismos de falla, que favorecen un mejor aprendizaje del fenómeno investigado. Como desventajas se puede referir a la gran cantidad de esfuerzo que requiere implementar un modelo constitutivo representativo, esto induce a que el investigador recurra a plataformas de modelación ya existentes como FLAC, PLAXIS, SIGMA/W, etc., lo que implica nuevos inconvenientes: estos programas se limitan a su configuración interna y si bien logran resultados aceptables en sus ecuaciones para resolver elementos finitos, fenómenos como la licuefacción no pueden ser representados adecuadamente y no se tiene acceso al código interno (Jefferies & Been, 2015).

Los modelos constitutivos (Huang & Yu, 2017) pueden emplear dos métodos en su formulación: el método Lineal Equivalente relacionado a un modelo viscoelástico equivalente que únicamente considera la no linealidad y curva de histéresis de la relación esfuerzo –

deformación; y el método No Lineal basado en un modelo elastoplástico o viscoelástico que es capaz de considerar las deformaciones acumuladas y una mejor aproximación a la respuesta dinámica de un suelo.

### 2.5.3. Programas informáticos y los modelos de elementos finitos.

El crecimiento exponencial de la capacidad de los sistemas informáticos generación tras generación ha permitido que los modelos numéricos sean una alternativa viable para el estudio de problemas del mundo real en muchos ámbitos de la investigación científica. Dado que las ecuaciones que conforman el modelo constitutivo de un sistema en análisis requieren complejas operaciones para su resolución, los beneficios de emplear sistemas informáticos y software especializado resulta evidente.

En la actualidad existen una gran variedad de software comercial, semi-comercial y de uso libre, orientados cada uno a diversas ramas de investigación: estructural, geotécnica, térmica, mecánica, de fluidos, entre otros. Es usual que el software sea limitado: carentes de interfaz gráfica que emplean una consola de comandos, aunque su uso suele ser complejo, estos dan libertad al usuario para definir los más diversos modelos de análisis, o bien poseen una interfaz gráfica interactiva con el usuario, usualmente limitan la capacidad de análisis en sistemas complejos o de gran cantidad de elementos. Un resumen del software disponible para modelar mediante elementos finitos se describe en la Tabla 10.

Tabla 10. Software que emplea modelos con elementos finitos.

Software	Características	Desarrollador	Licencia
ANSYS	Paquete de software orientado al análisis de estructuras, fluidos computacionales, transferencia de calor, etc.	Ansys Inc.	Licencia estudiantil
FEMtools	Simulación estática, dinámica, verificación y validación de elementos finitos.	Dynamics Design Solutions.	Pagado
DUNE	Entorno de métodos numéricos escrito en C++.	DUNE developer team	Libre
FreeFem++	Escrito en C++ para rápidas simulaciones de elementos infinitos.	Université Pierre et Marie Curie and Laboratoire Jacques-Louis Lions	Libre
SAP2000	Software de ingeniería civil y estructural que emplea modelos matemáticos.	Computers and Structures, Inc.	Pagado
Z88/Aurora	Paquete de modelamiento de elementos finitos basado en ANSI-C.	Frank Rieg	Libre
OpenSees	Recurso abierto para modelación de ingeniería sísmica.	Pacific Earthquake Engineering (PEER)	Libre
S-FRAME	Software para ingeniería civil y estructural.	SOFTEK Services Ltd.	Pagado

Fuente: GSE, 2013.

Elaboración: Los autores.

#### 2.5.4. Software Open-Source: OpenSees.

OpenSees, nombre derivado de Open System for Earthquake Engineering, es una estructura de software orientada a objetos y disponible como un recurso abierto. Este permite al usuario crear aplicaciones de elementos finitos para la simulación de sistemas estructurales y geotécnicos bajo la acción de cargas sísmicas. OpenSees está desarrollado principalmente en el lenguaje de programación C++, emplea algunas librerías de Fortran y C para la resolución de las ecuaciones y la implantación de materiales y elementos (PEER, 2012).

Este software ha sido desarrollado por el centro de investigación de ingeniería científica Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Dentro de sus ventajas, (PEER, 2006), se menciona la capacidad de modelar la respuesta no lineal de sistemas con una amplia gama de materiales, elementos y algoritmos: se puede distinguir diversos modelos para vigas, columnas, entre otras, para análisis de estructuras. Los modelos de suelos pueden representarse efectivamente con elementos continuos.

La presente investigación se basa en el uso del software OpenSees, por lo que es pertinente resumir a continuación los mecanismos de funcionamiento y simplificación en la generación de los modelos. La información que se muestra es obtenida del Manual de Usuario de OpenSees publicado por los mismos desarrolladores Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves (2007).

##### 2.5.4.1. Esquema de Análisis.

El método que emplea OpenSees se fundamenta en la creación de múltiples módulos para representar los elementos finitos como son: la especificación de las condiciones de análisis, los parámetros a evaluar durante el análisis y los resultados que se guardarán. Un esquema representativo se muestra en la Figura 41.

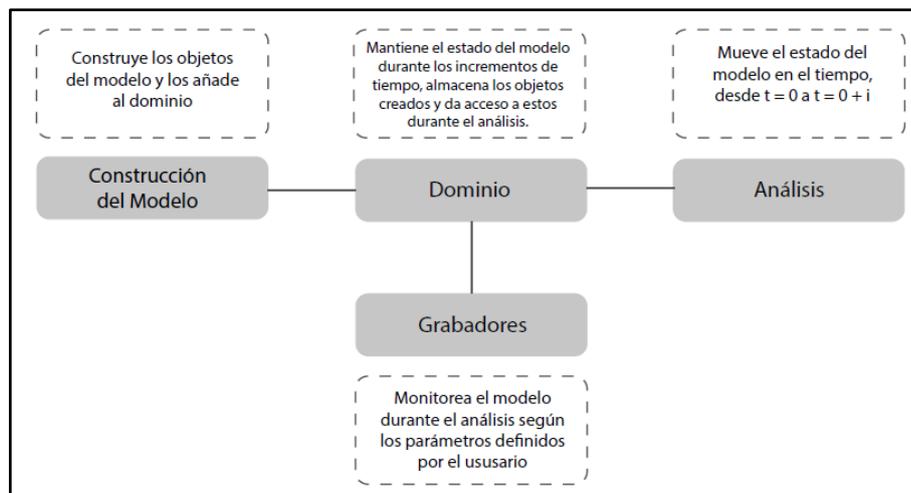


Figura 41. Esquema de análisis en el software OpenSees.

Fuente: Mazzoni et al., 2007.

Elaboración: Los Autores.

OpenSees funciona de manera elemental con un intérprete del lenguaje de programación TCL, lenguaje de sintaxis sencilla, orientado a objetos y empleado en el desarrollo de scripts y aplicaciones. OpenSees emplea su estructura y comandos para generar los modelos de elementos finitos. A continuación, se describe brevemente la sintaxis empleada por OpenSees y TCL.

La forma más básica de un comando se expresa así:

```
comando $argumento1 $argumento2 ...
```

Los comandos pueden anidarse uno dentro de otro

```
comando $arg1 [comando_anidado 1] ...
```

Las operaciones básicas se definen mediante el comando set:

```
set variable $valor  
set a 5
```

Esto expresa que la variable denominada 'a' es igual a 5. Para realizar operaciones matemáticas se emplea la siguiente estructura:

```
set a 5  
set b 7  
# operación suma  
expr $a + $b  
# operación multiplicación  
expr 3 * $a * $b
```

Para información adicional del lenguaje TCL se puede recurrir a estos enlaces:

- <http://www.tcl.tk/man/> (manual de usuario de tcl)
- <http://www.mit.edu/afs/sipb/user/golem/doc/tcltk-iap2000/TclTk1.html> (tutoriales de manejo de los comandos y creación de modelos)

#### **2.5.4.2. Módulo de Construcción del Modelo.**

Este módulo se encarga de realizar el primer paso en la representación de un modelo: la creación de elementos, nodos, cargas y restricciones existentes en un sistema real que va a ser analizado. En OpenSees se puede generar los siguientes objetos:

La generación del modelo empieza por definir un Modelo de Construcción, en este se define cuántas dimensiones posee el sistema que se va a analizar (hasta 3 dimensiones) y el número de grados de libertad que tendrá cada elemento (hasta 6 GDL). El comando para definir este objeto es:

*model BasicBuilder -ndm \$númeroDeDimensiones < -ndf \$númeroGDL >*

- Nodos

El comando Nodo permite construir los nodos o puntos de intersección de los elementos del modelo. A los nodos se les puede asignar coordenadas y masa nodal, su estructura es:

*nodo \$etiqueta \$coordX \$coordY \$coordZ <\$masa\_nodal>*

- Elementos

Los elementos a emplearse dependen del tipo de modelación que se busca representar, cada uno corresponde o puede estar compuesto por diferentes materiales, lo que da la posibilidad de evaluar un sistema real con múltiples esquemas de elementos finitos. Algunos de los elementos que se puede representar son:

*Elemento entramado (truss):* se emplea para representar elementos que simulan el entramado de armaduras o estructuras tipo cercha, usados ampliamente con materiales uniaxiales, estos se definen con el siguiente comando:

*element truss \$etiquetaElemento \$nodoi \$nodoj \$seccionTransversal \$etiquetaMaterial*

*Viga / columna elástica (elastic beam/column):* Este elemento es usado para representar una columna o viga de concreto, los parámetros dependen del número de dimensiones que el modelo posea.

*element elasticBeamColumn \$etiquetaElem \$nodoi \$nodoj \$secciónTransversal  
\$Young \$Iz \$coordGlobales*

*Elementos Longitud-Cero (ZeroLength):* Cuando es requerido construir un elemento con coordenadas iniciales y finales en la misma posición se emplea este comando. Un uso habitual de este elemento se da para representar amortiguamientos.

*element zeroLength \$etiquetaElem \$nodoi \$nodoj -mat \$material1 \$material2 ...  
-dir \$dir1 \$dir2 ... <-orient \$x1 \$x2 \$x3 \$yp1 \$yp2 \$yp3>*

*Elementos cuadriláteros (Quad Node):* su característica es representar elementos de cuatro nodos con una formulación isoparamétrica bilineal:

*element quad \$etiquetaElem \$nodoi \$nodoj \$nodok \$nodel \$espesor \$matTipo \$material  
<\$pressure \$rho \$b1 \$b2>*

*Elementos Brick:* permite representar un elemento de estructura cúbica semejante a un cubo, posee ocho nodos, y está definido por:

*element stdBrick \$etiquetaElem \$nodo1 \$nodo2 \$nodo3 \$nodo4 \$nodo5 \$nodo6  
\$nodo7 \$nodo8 \$material*

- Sección

Las secciones son una variación de la construcción de elementos lineales. Su característica principal es que poseen una sección que el usuario puede definir qué características lo delimitan. Algunas de las secciones que se puede modelar son las fibras, secciones elásticas, unielásticas, bidireccional, plano de membranas elásticas, etc.

- Restricciones

Las restricciones en TCL representan a los nodos libres con el valor de '0' y los nodos empotrados con el valor de '1'. Además, este lenguaje permite diferenciar entre dos tipos de restricciones: de Punto – Único, en donde la restricción solo se ve implicada en el grado de libertad (GDL) que se defina, o de tipo Multi – Punto, en los cuales la restricción de un GDL está relacionada con los restantes GDL del nodo donde se ha definido.

Los empotramientos de Punto – Único se definen con el comando:

*fix \$etiquetaNodo (ndf \$empotramientoGDL)*

El comando tiene variantes como fixX, fixY o fixZ que permiten funciones adicionales como el grado de tolerancia del valor de restricción, por defecto es  $1e^{-10}$ .

Los empotramientos de Multi – Punto pueden ser los siguientes:

Para definir una relación donde un GDL secundario debe tener el mismo empotramiento que un GDL que puede llamársele principal se emplea el comando:

*equalDOF \$nodoPrincipal \$nodoSecundario \$GDL1 \$GDL2 ...*

- Masa

Si la masa nodal no ha sido definida en el instante que se crean los nodos, puede emplearse el siguiente comando:

*mass \$etiquetaNodo (ndf \$masaEnLosGDL)*

- Material

Los objetos definidos con el comando Material pueden ser de dos clases: Materiales Uniaxial que representan únicamente las relaciones uniaxiales de esfuerzo – deformación, en una simulación sencilla de elementos elásticos, elasto – plásticos, viscosos, concreto o acero, entre otros. La otra alternativa son los Materiales Multidimensional (/nD) entre los que se

destacan los elásticos – isotrópicos, esfuerzo plano, placas de fibra, superficies multi rendimiento dependientes de la presión, materiales porosos solidos – líquidos.

Materiales uniaxiales representativos emplean los siguientes comandos para su definición:

*Material Elástico*: en donde las deformaciones son proporcionales en incremento a los esfuerzos aplicados (Figura 42a).

*uniaxialMaterial Elastic* *\$etiquetaMaterial* *\$móduloDeYoung* *<\$amort>*

*Material Elasto – Plástico Perfecto*: A cierta amplitud de esfuerzos, la deformación crece ampliamente con poco esfuerzo aplicado (Figura 42b).

*uniaxialMaterial ElasticPP* *\$etiquetaMat* *\$Young* *\$limElástico* *<\$epsyN \$defInicial>*

*Material Concreto 02*: Este material considera un ablandamiento lineal de esfuerzos de tensión (Figura 42c). Es una aproximación realista del comportamiento del concreto pues considera una pequeña resistencia a esfuerzos de tensión antes de fallar. El comando para este material es:

*uniaxialMaterial Concrete02* *\$etiMaterial* *\$resistenciaCompresión*  
*\$esfuerzoCompresión* *\$resistenciaFalla* *\$deformaciónFalla* *\$lambda*  
*\$resistenciaTensión* *\$reducciónResistTensión*

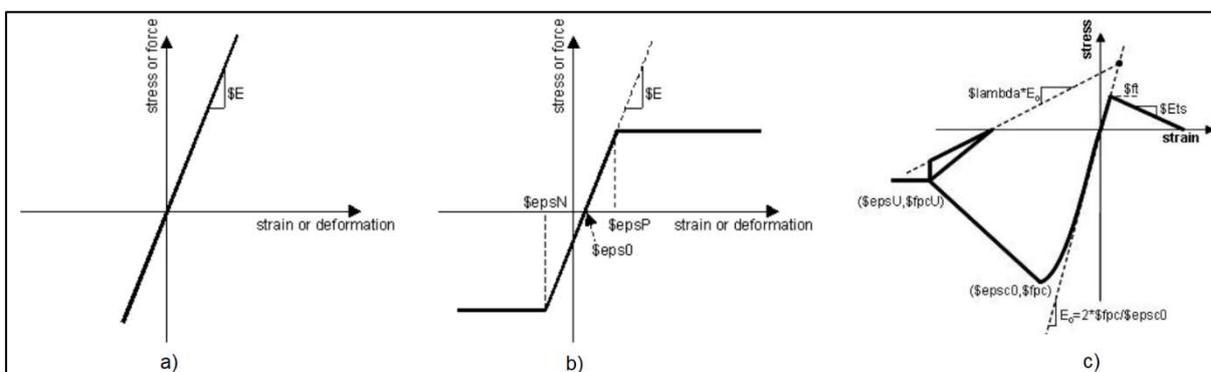


Figura 42. Curva esfuerzo – deformación en diversos materiales, en el software OpenSees.

Fuente: Mazzoni et al., 2007.

Elaboración: Los Autores.

Se apreciar en la Figura 42 que el software realiza una simplificación y aproximación lineal a las curvas esfuerzo – deformación de diversos materiales. Mientras mejor sea la aproximación al modelo real se requieren mayor cantidad de parámetros que usualmente son difíciles de obtener con precisión.

- Patrón de carga

Los patrones de carga son utilizados para definir la magnitud y variación de la intensidad de cargas aplicadas a elementos o nodos. Estos se asocian con el módulo Serie de Tiempo y el

comando Carga. Estos objetos son los encargados de aplicar esfuerzos externos sobre un modelo representado por elementos finitos.

*Patrón Plano (PatterPlain)*: para definir una carga simple lineal, como puede ser una carga constante de empuje, compresión o gravitatorio.

```
pattern Plain $etiquetaPatrón (serieDeTiempo argumentos) {  
  load (argumentos del comando load)  
  sp (argumentos del comando sp)  
  eleLoad (argumentos del comando eleLoad)  
}
```

Dentro del patrón de carga Plano se puede definir si las cargas actuantes están referidas a un elemento, a un nodo o a una restricción; como este patrón varía en función del tiempo su intensidad de carga depende de los argumentos de la serie de tiempo definida.

*Patrón de Excitación Uniforme (PatterUniformExcitation)*: cuando se definen cargas dinámicas dentro de la estructura modelada, de igual manera, su magnitud e intensidad está relacionada a la serie de tiempo con que se le asocie. A este patrón de carga se le puede definir parámetros como la dirección de la excitación o la velocidad inicial de los nodos afectados.

```
pattern UniformExcitation $etiquetaPatrón $dir -accel (serieDeTiempo argumentos)  
<-vel0 $velocidadInicial>
```

- Series de Tiempo

Las series de tiempo describen cuál será el comportamiento de las cargas aplicadas, por ejemplo, si son de tensión, compresión, se amplifican o reducen; entre las principales se tiene:

*Serie de Tiempo Constante (Constant)*: empleado para representar a una carga que se mantiene fija en el tiempo, con la posibilidad de ser afectada un coeficiente de ampliación o reducción (Figura 43a):

```
Constant <-factor$Factor >
```

*Serie de Tiempo Lineal (Linear)*: la carga es afectada por un incremento o decremento gradual y constante en todo el intervalo de tiempo de análisis (Figura 43b).

```
Linear <-factor$Factor >
```

*Serie de Tiempo Sinusoidal (Sine)*: ocasiona que la magnitud de la carga aplicada varíe como una función sinusoidal entre valores positivos y negativos; con una amplitud máxima definida, frecuencia y el intervalo de inicio – finalización (Figura 43c).

```
Sin$tInicial$tFinal$periodo <-shift$cambioFase ><-factor$Factor >
```

*Serie de Tiempo de Recorrido (Series)*: cuando la variación de la carga aplicada sigue un patrón aleatorio en intensidad y signo, como la carga de un sismo, se emplea este comando, puede ser definido de diversas maneras: cuando se importa el patrón desde un archivo externo, la sintaxis es la siguiente:

*Series -time {lista\_intervalos\_Tiempo} -values {lista\_valores} <-factor \$cFactor>*

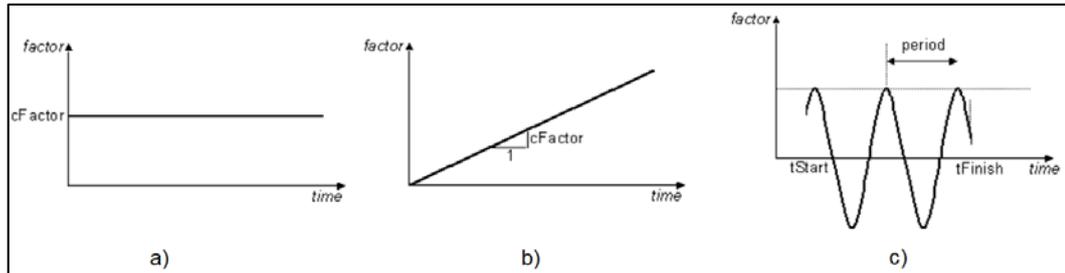


Figura 43. Series de tiempo relacionados a patrones de carga en el software OpenSees.  
Fuente: Mazzoni et al., 2007.  
Elaboración: Los Autores.

Estos elementos anteriormente descritos son un resumen de los que dispone OpenSees, para una mejor interpretación de los comandos empleados se recomienda el Manual Lenguaje de Comandos de OpenSees (2006).

### 2.5.4.3. Módulo del Dominio.

El Dominio almacena los objetos creados en el módulo Construcción del Modelo, y los objetos son provistos para interpretarse en los módulos de Análisis y Grabadores. El dominio sigue un proceso que se explica en la Figura 44 y es la función que agrupa toda la información del modelo de elementos finitos:

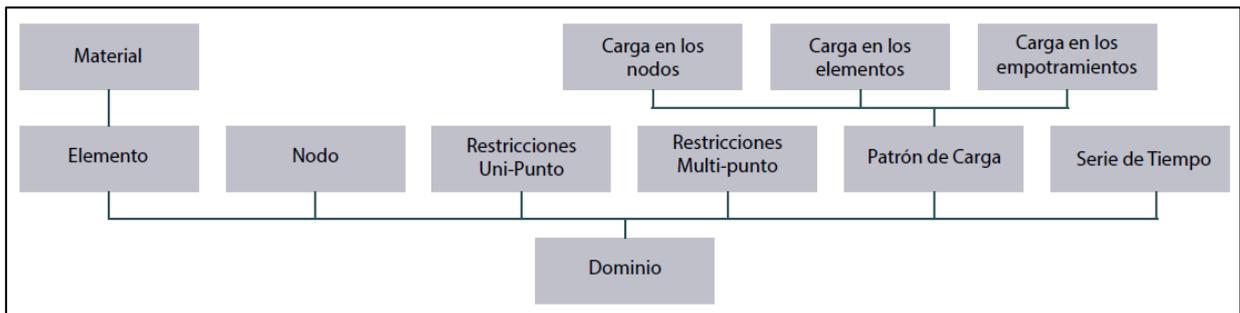


Figura 44. Esquema del Módulo 'Dominio'.  
Fuente: Mazzoni et al., 2007.  
Elaboración: Los Autores.

### 2.5.4.4. Módulo de Análisis.

Este módulo se encarga del análisis mediante elementos finitos: el modelo representado es llevado desde un estado inicial a través del incremento de tiempo. El análisis puede ser del tipo Lineal Estático Simple o No Lineal Transitorio; en la generación del modelo, el usuario define qué tipo y cómo se realizará el análisis. En la Figura 45 se muestra los elementos que se emplea en el software OpenSees para analizar el modelo.

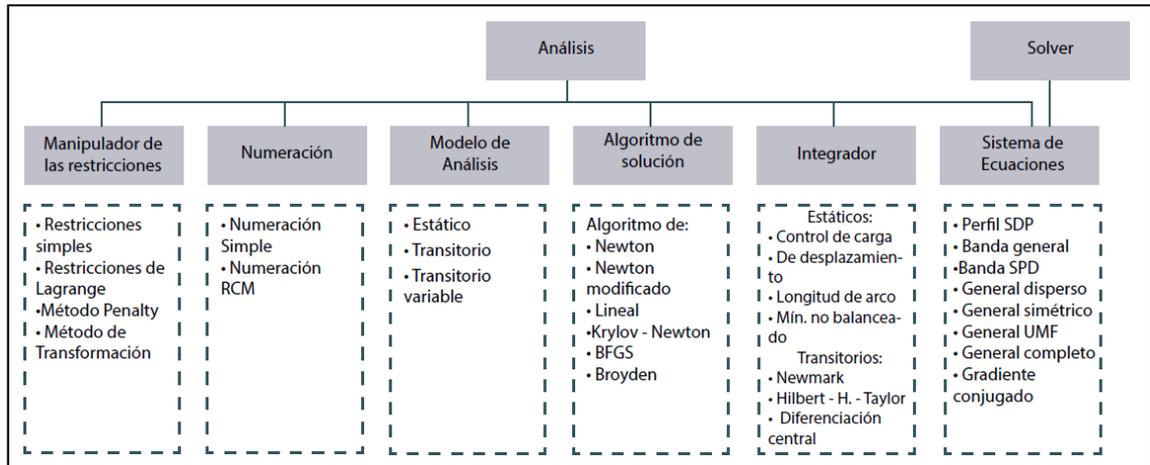


Figura 45. Esquema del Módulo Análisis.

Fuente: Mazzoni et al., 2007.

Elaboración: Los Autores.

#### 2.5.4.5. Módulo de Grabadores.

El módulo de Grabadores se encarga de registrar los parámetros definidos por el usuario antes del análisis, como puede ser el desplazamiento de un nodo, los esfuerzos hacia un elemento o sus deformaciones, tanto en función del tiempo o de la respuesta completa del modelo analizado. Este módulo supervisa el estado de los elementos que conforman el dominio y escribe en un archivo los resultados a intervalos definidos por el usuario, los archivos que son obtenidos se pueden procesar en diversos programas según sean las características que el usuario busca analizar.

La sintaxis para llamar a un grabador tiene la siguiente estructura:

```

recorderNode < -archivo$nombre >< -xml$nombre >< -time >
< -node($nodo1$nodo2...) >< -nodeRange$Ini$Fin >< -region$Reg >
< -nodeall > -dof($GDL1$GDL2...) $tipoResp

```

Como se muestra en el código anterior, el análisis de elementos finitos mediante OpenSees permite registrar de un elemento de interés (en el ejemplo: un nodo) su desplazamiento, esfuerzos, deformaciones, etc., en cualquiera de sus grados de libertad; estas respuestas se pueden almacenar en archivos de texto o xlm. El código permite registrar el comportamiento de la totalidad de elementos, de regiones o de elementos puntuales. Las funciones de cada uno de los grabadores se muestran en la Tabla 11.

La recopilación de información sobre métodos numéricos, elementos finitos, y el especial énfasis en el software OpenSees, que se ha expuesto anteriormente tiene el propósito de resaltar las ventajas y beneficios de emplear los sistemas informáticos para realizar investigaciones de problemas reales, que los métodos numéricos logran representaciones satisfactorias de problemas complejos y son altamente ilustrativos e impulsan el aprendizaje.

Tabla 11. Tipos de grabadores en OpenSees.

Tipo de grabadores	Comando tcl	Parámetros requeridos por del comando	Tipos de respuestas registradas	Tipo de salida de datos
De nodo	recorder Node	Nodos Grados de Libertad Tipo de Respuesta	Desplazamiento Velocidad Aceleración Desplazamiento Incremental Eigen vector de modo i Reacción nodal	Archivo de texto Archivo xls
Envolvente de nodo	recorder EnvelopeNode	Nodos Grados de Libertad Tipo de Respuesta	Desplazamiento Velocidad Aceleración Desplazamiento Incremental	Archivo de texto Archivo xls Interfaz de OpenSees
De elemento	recorder Element	Elementos Grados de Libertad Tipo de Respuesta	Fuerza Deformación Rigidez Esfuerzo - Deformación	Archivo de texto Archivo xls
Envolvente de elemento	recorder EnvelopeElement	Elementos Grados de Libertad Tipo de Respuesta	Fuerza Deformación Rigidez Esfuerzo - Deformación	Archivo de texto Archivo xls Interfaz de OpenSees
Derivas	recorder Drift	Nodo i - Nodo j Grados de Libertad Plano o eje (X, Y, Z)	Deriva entre dos nodos	Archivo de texto Archivo xls
Ventana de gráficos	recorder display	Título del gráfico Coordenadas X - Y Píxeles X - Y Archivo con información gráfica	Representación gráfica del archivo ingresado	Interfaz de OpenSees
Plot	recorder plot	Título del gráfico Coordenadas X - Y información Columna X - Y	Representación gráfica del contenido del archivo	Interfaz de OpenSees

Fuente: Mazzoni et al., 2007.

Elaboración: Los Autores.

Resaltando lo descrito según Wang & Manga (2009), se expresa la necesidad de investigar a detalle aquellos fenómenos consecuentes a la actividad sísmica poco entendidos como la licuefacción de suelos o movimiento de flujo: la relación de influencia de los diferentes tipos de ondas sísmicas para inducir la licuefacción o por las características geológicas de los suelos, la posibilidad de hacer predicciones con respecto a la generación de licuefacción; además, para que los resultados adquieran validez deben ser integrados con datos geotécnicos propios de los sitios investigados.

**CAPÍTULO III:  
METODOLOGÍA**

En la presente investigación se ha optado por el estudio de la licuefacción de suelos mediante métodos numéricos al emplear un programa informático para su modelación. Los métodos ampliamente extendidos para analizar este fenómeno se han basado en ensayos de campo y laboratorio, son usualmente son costosos o están limitados por la complejidad de replicar las condiciones in situ de los suelos. Por otro lado, al usar modelaciones numéricas se aprovecha la enorme capacidad de los procesadores actuales para resolver sistemas complejos que se representan con elementos finitos y permiten evaluar las condiciones más variadas y extremas que un modelo físico no podría representar fácilmente.

En esta investigación se ha tomado el modelo numérico de columna suelo no cohesivo desarrollado para OpenSees, el cual permite representar una columna de suelo en dos dimensiones con pendiente, nivel freático y compuesta por diversos estratos. La simulación consiste en aplicar una carga sísmica y registrar el comportamiento de la columna con la generación de resultados que incluyen el desplazamiento, aceleración y deformación en dos direcciones, el incremento de presión de poros, entre otros. Este modelo es un recurso libre creado por la universidad de Berkeley – California y se puede revisar en el siguiente enlace: [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Effective\\_Stress\\_Site\\_Response\\_Analysis\\_of\\_a\\_Layered\\_Soil\\_Columnn](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Effective_Stress_Site_Response_Analysis_of_a_Layered_Soil_Columnn).

El uso de este modelo numérico tiene la desventaja de representar un único escenario de análisis (Figura 46); donde la geometría, tipo de estratos o carga aplicada no pueden modificarse libremente y los resultados del análisis comprenden una extensa agrupación de datos que requieren de tratamiento adicional para su interpretación.

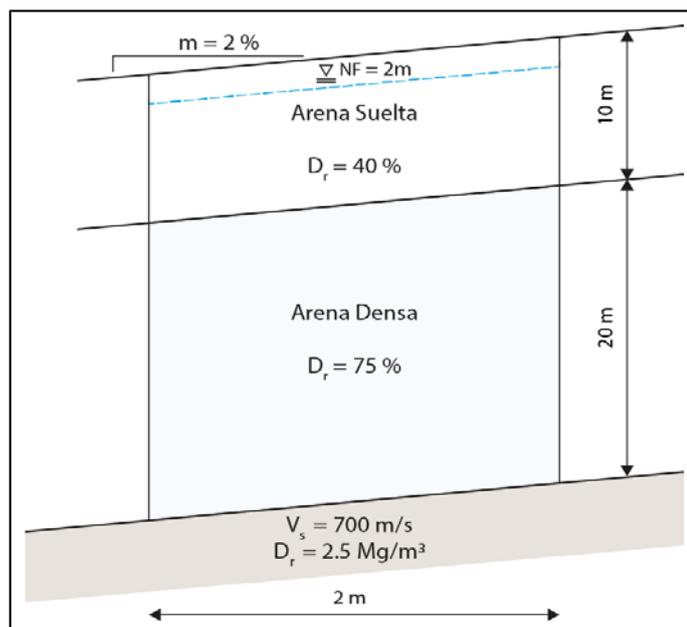


Figura 46. Escenario simulado por el modelo numérico de OpenSees.

Fuente: OpenSees, 2011.

Elaboración: Los Autores.

En las siguientes secciones se describirá el desarrollo de la metodología que ha consistido en tres fases (Figura 47): la creación de una herramienta informática de pre y post – proceso que complementa la modelación numérica antes descrita, la validación de resultados obtenidos por la herramienta creada, y el uso de la misma para analizar la licuefacción de suelos mediante diversos escenarios que han sido definidos por los autores.

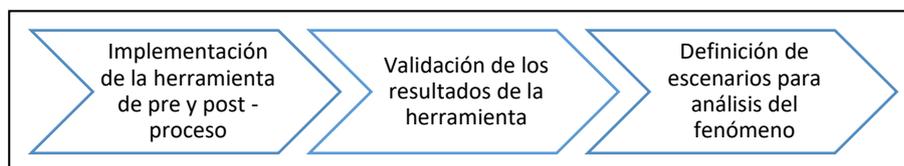


Figura 47. Fases para el desarrollo de la metodología.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Con la creación de la herramienta de pre y post – proceso se busca facilitar el uso del modelo original de OpenSees al permitir construir múltiples configuraciones de columnas de suelo y que los resultados del análisis sean representados gráficamente para una mejor interpretación de la respuesta de la columna. Al validar la herramienta se puede certificar que los resultados obtenidos sean los mismos a los que genere el código original con OpenSees. Y finalmente, emplear la herramienta para analizar diversos escenarios permite corroborar las hipótesis que definen la licuefacción de suelos, observar los efectos de la ocurrencia y los suelos más susceptibles a presentar este fenómeno.

### 3.1. Implementación de la herramienta informática.

Uno de los objetivos de esta investigación ha sido generar códigos fuente para el análisis del fenómeno de licuefacción mediante modelaciones matemáticas. Esto se ha conseguido al adoptar el modelo numérico de OpenSees antes mencionado y automatizarlo de tal manera que sea posible definir libremente los parámetros de la columna, ejecutar las simulaciones y generar gráficas de los resultados obtenidos.

Este modelo se ha sido elegido por las ventajas que representa: se puede realizar una simulación bastante completa de las condiciones in situ de un suelo, por ejemplo, el uso de múltiples estratos para definir la columna, la diferenciación entre estratos húmedos y secos por la presencia del nivel freático o la consideración de la pendiente del terreno; y principalmente, al ser un recurso libre se tiene acceso al código base y se permite modificarlo y ampliar su alcance.

El modelo numérico original permite analizar un único escenario para el cual fue creado y el software OpenSees en el cual se ejecuta no posee una interfaz gráfica desarrollada para lo cual debe usarse a través de un intérprete o consola de comandos. En la presente investigación se ha buscado superar estas limitaciones del modelo original mediante la creación y validación de una herramienta de pre y post – proceso.

Esta herramienta informática se optimizó para vincular el modelo numérico y su motor de análisis OpenSees con una interfaz gráfica desarrollada en Matlab. La automatización del modelo numérico elegido ha implicado una modificación de su código base; este nuevo código generado, término a usarse en las referencias siguientes, es empleado durante el pre – proceso para definir la columna de suelo a analizar y por el post – proceso para representar gráficamente los resultados obtenidos.

A continuación se describe la estructura del modelo numérico generado y las consideraciones para la implementación de las interfaces gráficas de pre y post – proceso que conforman la herramienta informática. En el Anexo A.i. puede revisarse íntegramente el código generado.

### 3.1.1. Descripción del modelo numérico.

El modelo numérico se trata de la representación mediante elementos finitos de una columna de suelo en dos dimensiones a la cual se aplica una carga sísmica y se registra la respuesta dinámica de la misma.

La definición de un escenario de análisis se limita a suelos no cohesivos y se puede constituir por múltiples estratos desde muy flojos a muy densos. Durante la simulación se realiza en primera instancia un análisis estático sin cargas externas para representar la consolidación natural del suelo y seguidamente un análisis dinámico donde la columna es afectada por cargas de sismo; en los resultados se registra el comportamiento de la columna en toda su longitud y durante el tiempo que dure el análisis.

El modelo numérico funciona a través del código generado durante esta investigación, el cual está escrito en el lenguaje de programación TCL. Los procesos que el código sigue para representar la columna de suelo mediante elementos finitos se muestran en la Figura 48.

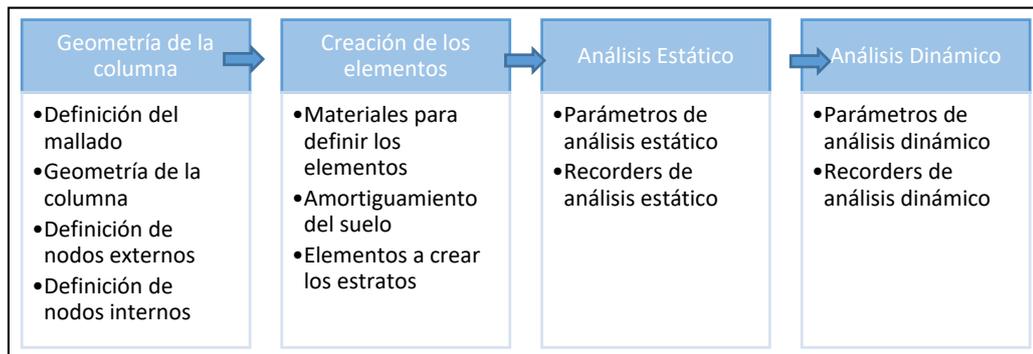


Figura 48. Procesos del código generado para simulación de una columna de suelo mediante elementos finitos.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.1.1.1. Definición del mallado.

Al emplearse una modelación numérica, toda la columna del suelo se representa mediante un mallado de elementos finitos. Este código emplea el elemento de mallado denominado "Nine Four Node QuadUP" perteneciente a las librerías de OpenSees.

Este elemento posee dos dimensiones y se define mediante nueve nodos (Figura 49), la información necesaria para su creación es tomada de la geometría general de la columna, la cantidad de estratos y sus propiedades geotécnicas.

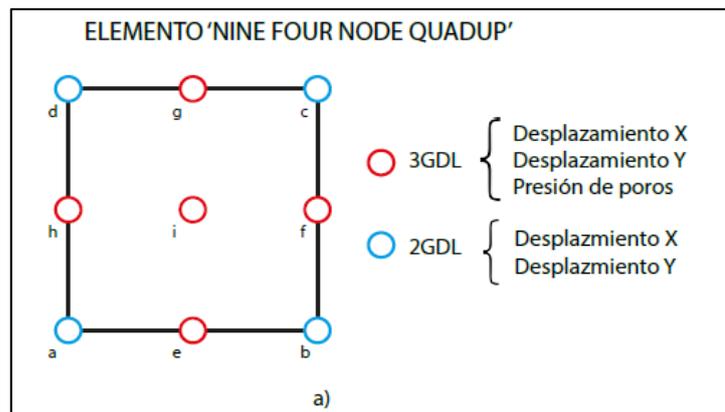


Figura 49. Elemento de mallado Nine Four Node QuadUP.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Se caracteriza por diferenciar entre los nodos externos e internos: los nodos exteriores poseen tres grados de libertad (GDL), dos de ellos registran desplazamientos y el tercero la presión de poro; los nodos interiores poseen únicamente 2 GDL que registran desplazamientos.

### 3.1.1.2. Geometría de la columna de suelo.

La geometría general de la columna (Figura 50) incluye los siguientes parámetros:

- Altura
- Ancho
- Pendiente
- Cantidad y espesor de los estratos
- Ubicación del nivel freático
- Densidad y velocidad de onda de corte de la roca madre

Con esta información, el código generado establece el tamaño y cantidad de elementos requeridos para definir la columna de suelo, los estratos saturados y la pendiente que estos poseen; además la composición del material subyacente que restringe y soporta la columna modelada durante el análisis.

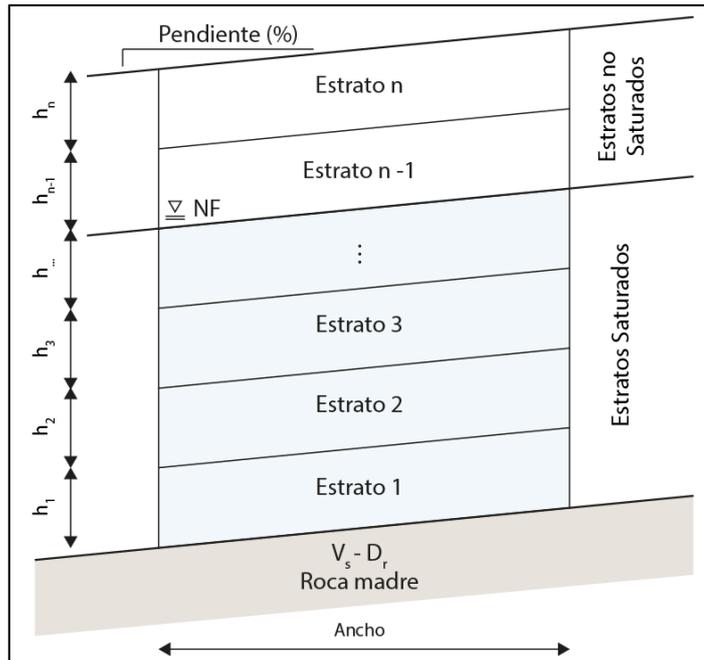


Figura 50. Parámetros para definir geometría de la columna de suelo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.1.1.3. Definición de los nodos externos.

La definición de las coordenadas y restricciones de los elementos de mallado requiere usar dos módulos del tipo "ModelBuilder"; el primero de ellos usado para crear los nodos externos que poseen tres grados de libertad con el siguiente comando:

```
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3
```

Esta línea de comando indica la generación de un modelo de dos dimensiones (X, Y) y cada nodo de los elementos posee tres grados de libertad: en los elementos "Nine Four Node QuadUP", los dos primeros grados de libertad registran desplazamientos y el tercero, el incremento de la presión de poros. Las coordenadas son generadas secuencialmente de izquierda a derecha y desde abajo hacia arriba para un total de cinco nodos por elemento (nodos a-b-c-d-i de la Figura 49).

De acuerdo a la Figura 51, los nodos 1 y 3 que están en contacto con la roca madre son fijados en su grado de libertad vertical. La información registrada de la presión de poro y desplazamiento del resto de nodos exteriores, es replicada mediante el comando 'equalDOF' con el fin de simular una deformación homogénea en aquellos nodos ubicados a la misma altura (nodos 4-6 y 7-9 de la Figura 51).

### 3.1.1.4. Definición de los nodos internos.

El segundo módulo de tipo "ModelBuilder" es usado para definir las coordenadas de los nodos internos que poseen dos grados de libertad y la sintaxis de su comando es la siguiente:

*model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 2*

Se indica con esta línea de comando la generación de un modelo de dos dimensiones donde los elementos definidos poseen dos grados de libertad. De la misma manera, las coordenadas de los nodos internos se generan secuencialmente desde abajo hacia arriba y de izquierda a derecha para un total de cuatro nodos (nodos e-f-g-h de la Figura 49).

El nodo 2 en contacto con la roca madre (Figura 51), tiene restringido su grado de libertad vertical. El resto de nodos internos mediante el comando 'equalDOF' replican la información registrada en aquellos ubicados a la misma altura (nodos 4-6 y 10-12 de la Figura 51).

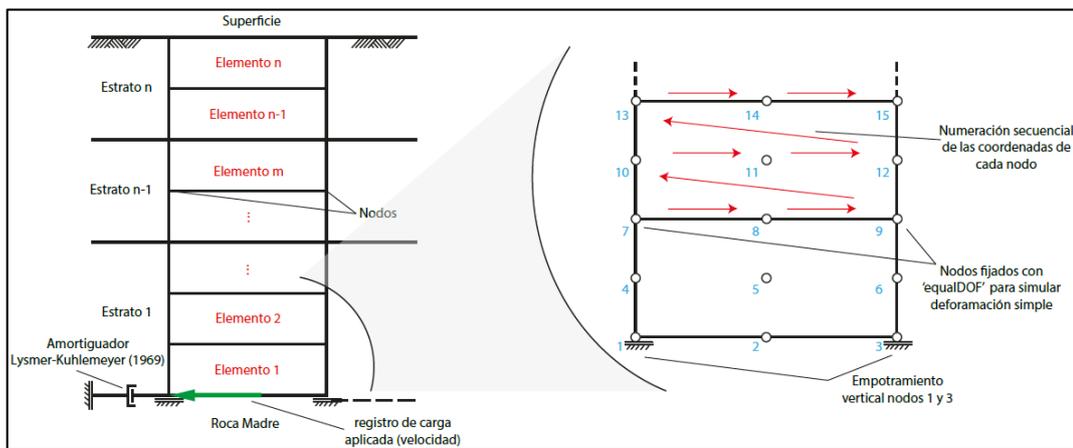


Figura 51. Secuencia de generación de la columna de suelo.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

**3.1.1.5. Creación del material del suelo.**

Para la creación de los elementos de mallado, a parte de sus coordenadas, se debe especificar el material del cual está conformado. En este modelo numérico se emplea el material denominado "PressureDependMultiYield02" creado para OpenSees con el fin de simular el comportamiento constitutivo de suelos no cohesivos, la curva esfuerzo – deformación se representa en la Figura 52 y la sintaxis de su comando es:

```
nDMaterial PressureDependMultiYield02 $tag $nd $rho $refShearModul
$refBulkModul $frictionAng $peakShearStra $refPress $pressDependCoe
$PTAng $contrac1 $contrac3 $dilat1 $dilat3 <$noYieldSurf=20 <$r1
$Gs1 ...> $contrac2=5. $dilat2=3. $liquefac1=1. $liquefac2=0. $e=0.6
$cs1=0.9 $cs2=0.02 $cs3=0.7 $pa=101 <$c=0.1>>
```

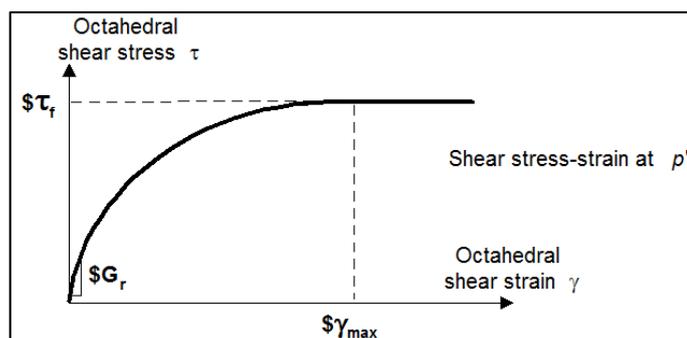


Figura 52. Curva esfuerzo – deformación del material PressureDepensMultiYield02.

Fuente: Yang, 2012. Recuperado de: <https://goo.gl/JUiohb>.

Elaboración: Los Autores.

Los parámetros que requiere el comando de este material son obtenidos mediante ensayos de laboratorio; sin embargo, en la Tabla 12 se muestran algunos valores recomendados.

Para cada estrato corresponde la creación de un nuevo material que represente sus características particulares. Los estratos que están bajo el nivel freático se crean al usar la densidad saturada del suelo; aquellos que se encuentran sobre el nivel freático, la densidad relativa seca es determinada en función de la densidad del material que está saturando la columna de suelo, por defecto este material es agua.

Tabla 12. Parámetros geotécnicos del material PressureDepensMultiYield02.

Densidad Relativa	30%	40%	50%	60%	75%
Densidad saturada (ton/m)	$6 \times 10^4$	$9 \times 10^4$	$10 \times 10^4$	$11 \times 10^4$	$13 \times 10^4$
Módulo de corte (kPa)	$16 \times 10^4$	$22 \times 10^4$	$23.3 \times 10^4$	$24 \times 10^4$	$26 \times 10^4$
Ángulo de fricción	31	32	33.5	35	36.5
PTAng	31	26	25.5	26	26
Deformación de corte (kPa)	0.1				
Presión confinamiento (kPa)	101				
Coef. Variación bulk/G	0.5				
Coef. Contracción 1	0.087	0.067	0.045	0.028	0.013
Coef. Contracción 3	0.00	0.06	0.06	0.10	0.00
Coef. Dilatación 1	0.00	0.06	0.06	0.01	0.30
Coef. Dilatación 3	0.00	0.27	0.15	0.05	0.00
Relación de vacíos	0.85	0.77	0.70	0.65	0.55

Fuente: Yang, 2012. Recuperado de: <https://goo.gl/QwQNAU>.

Elaboración: Los Autores.

### 3.1.1.6. Amortiguamiento en el suelo.

Este amortiguamiento es usado para simular la rigidez finita de la roca madre sobre la cual está soportada y fijada la columna de suelo a modelarse; se encuentra ubicado en el nodo 1 del elemento 1 de la columna.

El código generado simula el tipo de amortiguamiento definido por Lysmer-Kuhlemeyer (1969) a través de un elemento “ZeroLength” de OpenSees. Por defecto han sido establecidos como valores característicos: la densidad de la roca madre en 2.5 Mg/m<sup>3</sup> y la velocidad de onda de corte en 700 m/s.

#### **3.1.1.7. Creación de los elementos del suelo.**

Una vez que se ha definido el tamaño, coordenadas, condiciones de contorno y materiales que conforman a cada elemento, estos son creados con el comando:

```
element 9_4_QuadUP $j $nA $nB $nC $nD $nE $nF $nG $nH $nI  
$thick($i) $i $uBulk($i) 1.0 1.0 1.0 $xWgt($i) $yWgt($i)
```

En donde los parámetros representan las coordenadas del elemento, su espesor, módulo de Bulk y magnitud aceleración horizontal y vertical de la gravedad. Los valores de 1.0 m/s indican la permeabilidad del suelo, usados únicamente durante el análisis estático, con el fin de reducir la cantidad de iteraciones necesarias para llegar a la respuesta estática. Como se muestra en la Figura 51, los elementos se generan desde la parte inferior hacia la superficie.

Al finalizar la creación de los elementos del mallado, la columna de suelo representada mediante elementos finitos está terminada y solo resta definir las condiciones que regirán los análisis estático y dinámico del modelo; además, especificar los parámetros a registrar como respuesta dinámica de la columna a lo largo de la simulación.

#### **3.1.1.8. Recorders del análisis estático.**

Un recorder es un módulo de OpenSees que permite seleccionar los parámetros que se registran y exportan en archivos .txt luego de haber finalizado la simulación de un modelo. Los parámetros disponibles dependen del tipo de elemento seleccionado para el mallado y el material del cual se conforma.

Como se ha descrito, en el código generado se emplea los elementos “Nine Four Node QuadUP” conformados por el material “PressureDepensMultiYield02” que simula el comportamiento de suelos no cohesivos; los parámetros que estos permiten registrar son los siguientes:

Por nodo:

- Desplazamiento en dirección X y Y
- Aceleración en dirección X y Y
- Presión de poro

Por elemento:

- Deformación en dirección XX, YY, XY
- Esfuerzo en la dirección XX, YY, ZZ, XY

La información que registra cada uno de estos parámetros incluye los nueve nodos de cada uno de los elementos que constituyen la columna de suelo y para cada instante de tiempo que dura el análisis estático y dinámico.

Por lo tanto, con el propósito de disminuir el extenso conjunto de datos obtenidos, se ha configurado los recorders del análisis estático para registrar únicamente los siguientes parámetros en cada elemento: la presión de poro y los desplazamientos X y Y en los nodos del extremo izquierdo de la columna y los datos de esfuerzo y deformación en el nodo 9 o nodo central. Esto para todos los intervalos de tiempo que dura el análisis.

El comando de los recorders tiene la siguiente estructura:

```
recorder Node -file Gdisplacementx.out -time -node $nodeList3 -dof 1 disp"
```

Luego de la definición de los parámetros a registrar mediante los recorders, en la aplicación se realiza las siguientes consideraciones previas al análisis estático y dinámico:

Al tratarse de un modelo constitutivo que representa un suelo elasto – plástico, se emplea un amortiguamiento de Rayleigh para simular el porcentaje de amortiguamiento interno que existe en la fase de deformaciones pequeñas de un modelo. El amortiguamiento de Rayleigh está controlado por las frecuencias cíclicas de dos modos de vibración y la relación de amortiguamientos (que también dependen de las frecuencias cíclicas), estos términos están explicados a mejor detalle en Chopra (2007).

Oliveira, Roca, & Goula (2006) mencionan que para la mayoría de investigaciones de análisis dinámico es usual emplear el valor de aceleración máxima (PGA) y algunas ordenadas del espectro de respuesta de ciertas frecuencias de interés, generalmente delimitadas por 0.2 y 20 Hz. El código generado emplea este mismo rango de frecuencias cíclicas para definir el amortiguamiento de Rayleigh.

### **3.1.1.9. Análisis Estático.**

Anteriormente se ha mencionado que el modelo numérico realiza un análisis estático para considerar la consolidación del suelo y posterior a ello, se realiza el análisis dinámico empleando la carga de sismo.

El análisis estático es en realidad un análisis dinámico realizado con intervalos de tiempo considerablemente largos para simular un análisis gravitatorio, con el fin de evitar los conflictos de mezclar análisis estáticos y dinámicos en la misma modelación numérica.

El material empleado para construir los elementos del mallado posee dos fases o etapas en su comportamiento esfuerzo – deformación: la primera que considera un comportamiento

elástico y en la segunda de tipo plástico (Figura 52); lo que conlleva a realizar el análisis estático en dos ocasiones; las etapas del material se actualizan con el comando:

*updateMaterialStage -material 1 -stage 0*

El análisis estático tiene las siguientes propiedades: se efectúa sin cargas externas y los elementos son los que inducen esfuerzos debido al peso propio; en primera instancia se ejecuta el análisis en 10 pasos con intervalos de 500 s para representar el confinamiento del suelo con la consideración de un material elástico. Una vez que este converge, el material que conforma los elementos del mallado se actualiza para considerar su comportamiento plástico y nuevamente el análisis estático se ejecuta, ahora en 40 pasos con incrementos de tiempo de 500 s. Los parámetros que emplean elementos de OpenSees usados para el análisis estático se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13. Parámetros del análisis estático.

Método de fijación de nodos	Penalty (1.0e14)
Test de convergencia	Desplazamiento incremental Norm (1.0e-3) – 100 iteraciones
Algoritmo	Krylov – Newton
Numerador	RCM
Sistema	Perfil SPD
Integrador	Newmark
Tipo de análisis	Transitorio

Fuente: Los Autores.

Fuente: Los Autores.

### 3.1.1.10. *Recorders y Análisis Dinámico.*

Antes de realizar el análisis dinámico, se actualiza los valores de permeabilidad en los nodos que registran la presión de poros. Dado que este modelo numérico está orientado a suelos no cohesivos, la permeabilidad se ha fijado en  $1.0e^{-4}$  m/s. Respecto a los recorders para el análisis dinámico siguen exactamente las mismas consideraciones empleadas para el análisis estático.

El análisis dinámico es el proceso que evalúa la columna de suelo modelada y se orienta en esta investigación a evaluar el fenómeno de licuefacción de los suelos. La carga dinámica que se emplea es una carga sísmica representada por un registro de aceleraciones. Esta carga es aplicada en la base de la columna y el paso del tiempo está definido por la frecuencia de muestreo en la que se registró dicho acelerograma.

El patrón de carga “PlainPattern” (Figura 51) del software OpenSees se usa para representar el sismo. Éste se lo define en el nodo 1 del elemento 1 de la columna y representa una carga

constante de magnitud unitaria aplicada en la dirección X. La serie de tiempo, por su parte está conformada por el acelerograma del sismo empleado para analizar el modelo, el cual amplifica o reduce la magnitud de la carga aplicada “PlainPatter”. El análisis dinámico se define con los parámetros mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros del análisis dinámico.

Método de fijación de nodos	Penalty (1.0e16)
Test de convergencia	Desplazamiento incremental Norm (9.0e-3) – 200 iteraciones
Algoritmo	Krylov – Newton
Numerador	RCM
Sistema	Perfil SPD
Integrador	Newmark
Tipo de análisis	Transitorio
Cantidad e intervalo entre pasos	Frecuencia y duración del sismo

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Dado que algunos modelos de columna de suelo no pueden resolverse al tener condiciones extremas de pendiente, intensidad de carga u otros, el código generado incluye un proceso de convergencia. Este proceso cuando identifica errores en la solución del modelo disminuye el paso de tiempo del análisis para alcanzar la convergencia.

### 3.1.2. Implementación de las interfaces gráficas.

La herramienta informática que se ha propuesto desarrollar en esta investigación funciona al vincular el modelo numérico generado y una interfaz gráfica para el pre y post – proceso.

Si bien el modelo numérico ha sido automatizado, aún se tiene limitaciones en su aplicación: construir un modelo de columna de suelo implica el uso de un intérprete de comandos y; posterior al análisis, los resultados se obtienen como un conjunto de datos almacenados en archivos .txt.

En los siguientes apartados se detalla las consideraciones tomadas para la creación una interfaz de pre y post procesamiento. La primera permite definir ordenadamente los parámetros de una columna de suelo para su análisis, codifica la información en lenguaje TCL y se la exporta al modelo numérico que realiza la simulación mediante OpenSees. Y la segunda interfaz dedicada al post – procesamiento de los resultados obtenidos, genera gráficas y reportes de valoración. Las interfaces de la herramienta informática se han construido a través de la aplicación GUIDE (GUI development environment) del software Matlab, que facilita la creación de aplicaciones de interfaz gráfica autocontenidas o independientes (ejecutables).

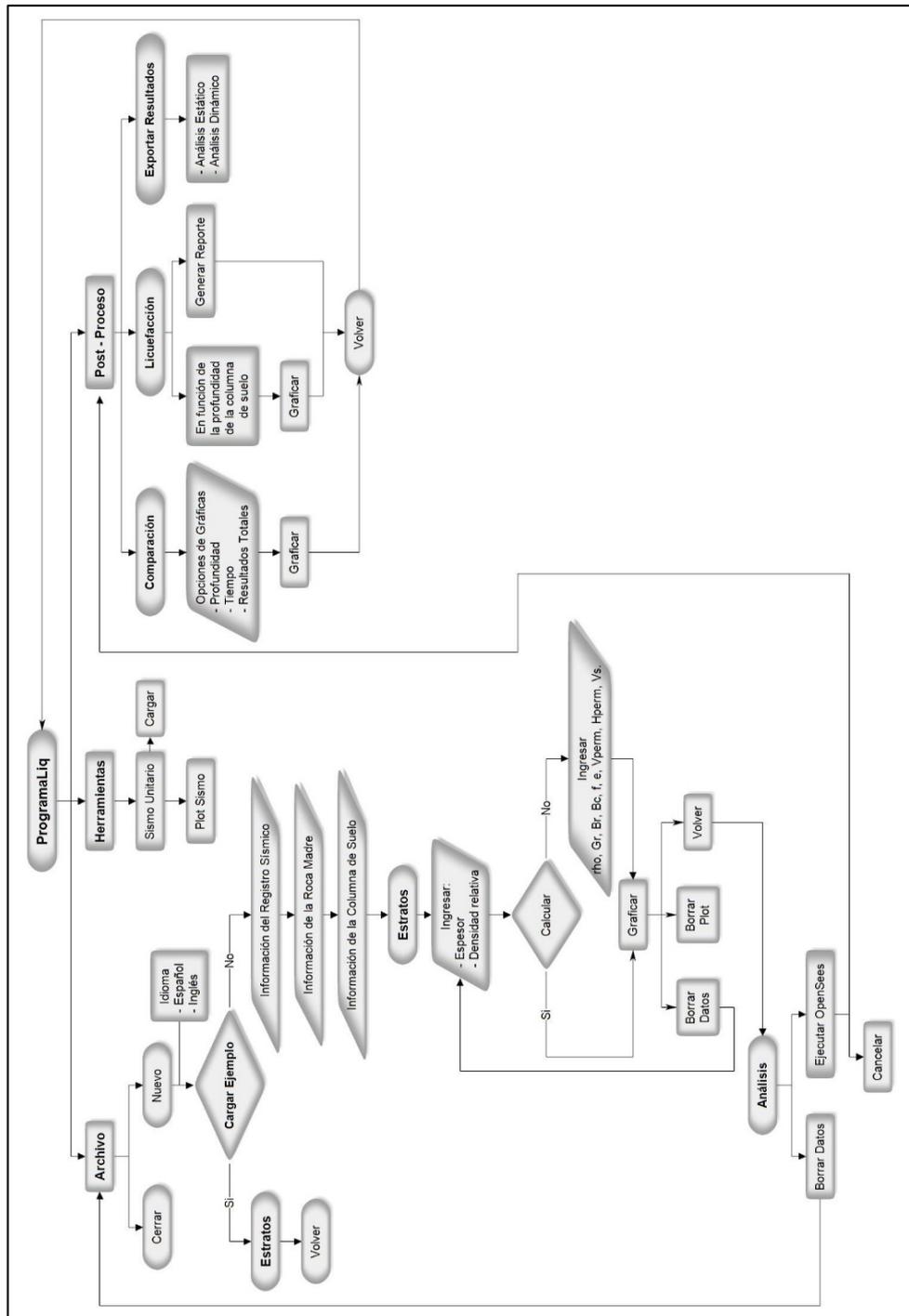


Figura 53. Flujoograma general de la herramienta de análisis del fenómeno de licuefacción.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Los procesos que integran herramienta generada para modelar el fenómeno de licuefacción se detallan en el flujoograma de la Figura 53. Como se puede observar, la creación de un nuevo modelo de columna de suelo inicia en el proceso “Archivo”, el cual da la posibilidad cargar un ejemplo base para su simulación o definir la geometría y propiedades geotécnicas de una

columna en particular; por tanto, el pre – procesamiento que ofrece la herramienta informática está definido dentro del proceso “Archivo” y este se vincula al proceso “Post - procesamiento”, mediante el cual los resultados de las simulaciones se representan gráficamente o en reportes que permiten la funcionalidad, como su nombre lo indica, de post – procesamiento de los modelos creados en la herramienta informática.

### 3.1.2.1. Pre-procesamiento.

En esta sección se describe las diversas consideraciones para cumplir con el pre - proceso de una columna de suelo a simularse mediante la herramienta informática creada. Entre ellos la estructura que posee la interfaz de pre – proceso, los parámetros necesarios para definir un modelo de columna, la carga sísmica y otras funcionalidades incluidas en la herramienta.

#### 3.1.2.1.1. Interfaz de pre - procesamiento.

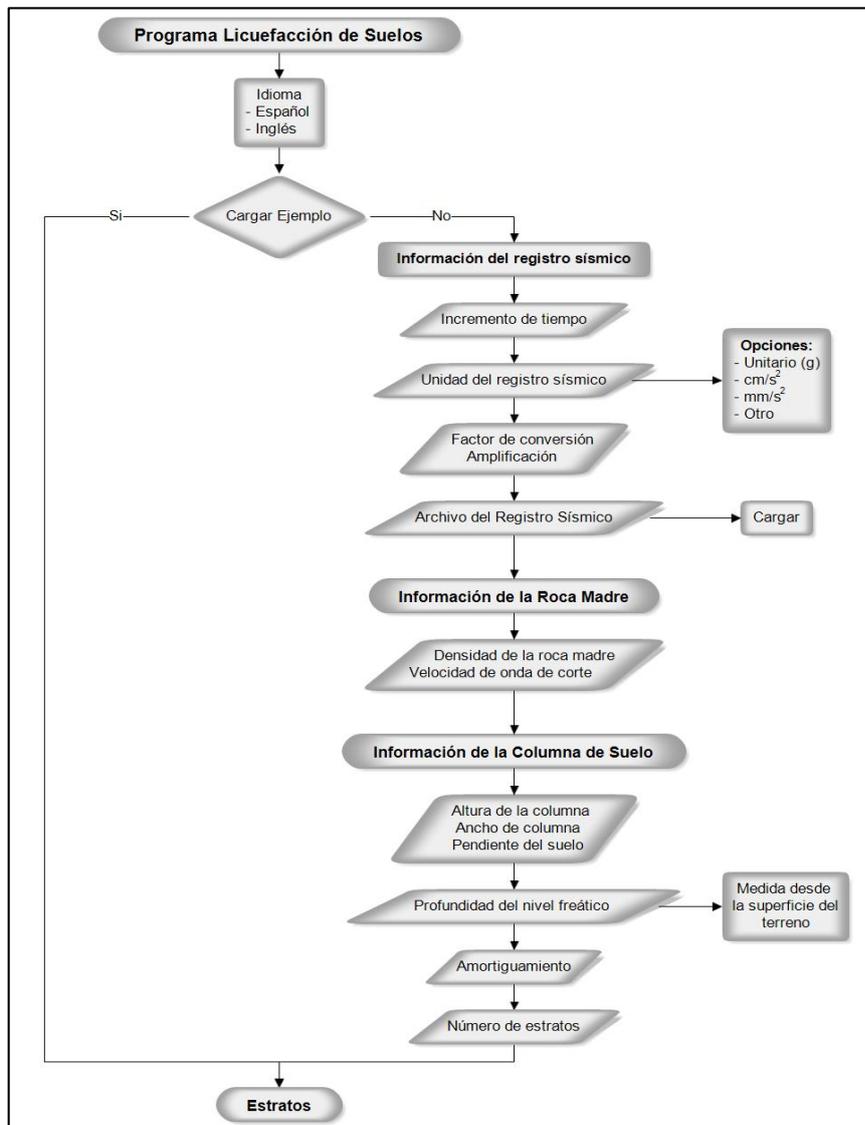


Figura 54. Flujograma de la interfaz principal de la herramienta de pre – proceso.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

El pre – procesamiento se realiza mediante dos interfaces: la principal denominada “ProgramaLiq” y la secundaria “Estratos”.

La interfaz principal “ProgramaLiq” de la herramienta (Figura 54) recopila la información geométrica y de carga sísmica para la definición del modelo de columna de suelo. La información se organiza mediante este proceso: primero, la importación y procesamiento de un registro sísmico de aceleraciones y convertido a registro de velocidad en m/s; luego el ingreso de las características de la roca madre donde se soporta el modelo analizado, y finalmente, la definición de las propiedades geométricas del suelo, lo que concluye con la apertura de la interfaz secundaria de pre - procesamiento, en la que se define las propiedades geotécnicas para cada estrato que posea la columna de suelo.

La interfaz secundaria “Estratos” obtiene la información restante para modelar la columna de suelo entre ella: los parámetros geotécnicos de cada estrato de suelo como se explica en el flujograma de la Figura 55. Además, en la interfaz “Estratos” se incluye un proceso para calcular los parámetros geotécnicos de un estrato en función de su altura y densidad relativa.

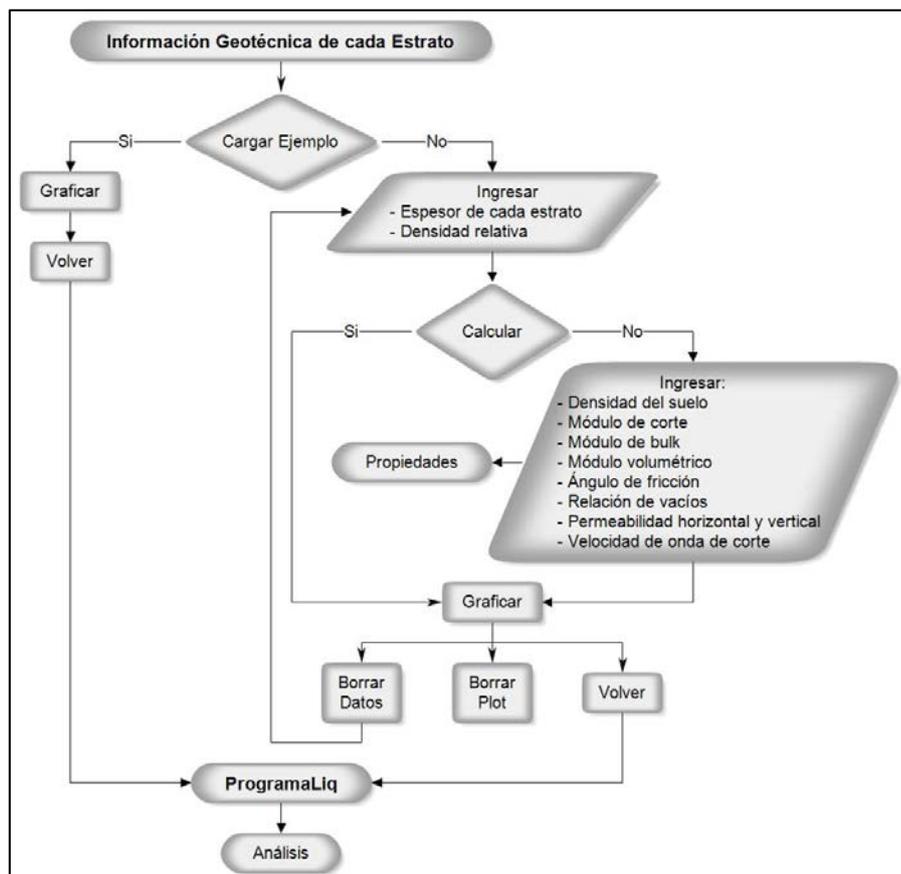


Figura 55. Flujograma de la interfaz secundaria de pre – proceso.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.1.2.1.2. *Parámetros generales para la modelación.*

La interfaz requiere que el ingreso de la información detallada en la Tabla 15 para la adecuada modelación numérica; la información es internamente codificada y exportada en archivos .txt para su interpretación en el motor de análisis OpenSees.

Tabla 15. Datos de entrada para la herramienta de pre-proceso.

<b>Información geométrica de la columna y estratos</b>	<b>Información geotécnica de la columna de suelo</b>	<b>Información geotécnica de los estratos</b>
Altura (m)	Nivel freático (m)	Densidad relativa (%)
Ancho (m)	Amortiguamiento (%)	Densidad saturada (ton/m <sup>3</sup> )
Pendiente (%)	Densidad de la roca madre (Mg/m <sup>3</sup> )	Módulo de corte (kPa)
Número de estratos	Vs de la roca madre (m/s)	Módulo de Bulk (kPa)
		Módulo Volumétrico Bc (kPa)
		Ángulo de fricción ( grados )
		Relación de vacíos (adim)
		Permeabilidad del suelo (m/s)
		Vs de cada estrato (m/s)

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores

### 3.1.2.1.3. *Carga sísmica.*

Dado que la licuefacción es un fenómeno principalmente desencadenado durante eventos sísmicos, la herramienta informática se ha optimizado para emplear un acelerograma como carga dinámica que afecta al modelo de columna de suelo.

Las funciones de la herramienta que se han incluido para el tratamiento de la carga sísmica incluyen la conversión de unidades y la amplificación o reducción de la intensidad sísmica. Internamente, la herramienta se apoya en el código ProcessMotion.m incluido en el modelo numérico de esfuerzos totales desarrollado por OpenSees (disponible en el sitio web: [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Site\\_Response\\_Analysis\\_of\\_a\\_Layered\\_Soil\\_Column\\_\(Total\\_Stress\\_Analysis\)](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Site_Response_Analysis_of_a_Layered_Soil_Column_(Total_Stress_Analysis))), su función es convertir las múltiples columnas de un acelerograma en dos columnas de velocidad respecto al tiempo. Este nuevo registro es empleado para definir la serie de tiempo que se aplica al modelo de elementos finitos durante el análisis.

### 3.1.2.1.4. *Otras funcionalidades.*

Se ha optado por la inclusión procesos adicionales con el fin de facilitar el uso de herramienta y el estudio del fenómeno de licuefacción, entre ellas: la normalización del registro de aceleraciones de un sismo, la visualización de ayudas en las interfaces, la representación gráfica del modelo que se está implementando, imágenes y tablas con los valores usuales de los parámetros poco conocidos. Además, la inclusión de un ejemplo base que permite familiarizarse con el entorno, y la posibilidad de cambiar entre idiomas español e inglés en todas las interfaces de la herramienta.

### 3.1.2.2. Post-procesamiento.

La interfaz de post – procesamiento se ha desarrollado para automatizar el tratamiento de los resultados obtenidos durante el análisis, que muestra varios parámetros importantes en la evaluación del fenómeno de licuefacción.

El post – proceso se basa en la visualización gráfica de la información exportada como archivos .txt por OpenSees luego del análisis. Dentro de las alternativas disponibles para evaluar el fenómeno de licuefacción y la respuesta de una columna de suelo a cargas sísmicas se ha incluido comparativas entre diferentes instantes de tiempo o altura de la columna de suelo para los parámetros de: desplazamiento, aceleración, incremento de presión de poros, esfuerzos torsionales, de corte, deformaciones, etc.; la representación de curvas esfuerzo – deformación, esfuerzos efectivos, entre otros.

Para lograr el post – procesamiento de un modelo de columna de suelo, se ha establecido la creación de dos interfaces gráficas: “Comparación” y “Licuefacción”, las consideraciones que se han tomado se describen a continuación.

#### 3.1.2.2.1. Interfaz de post - procesamiento.

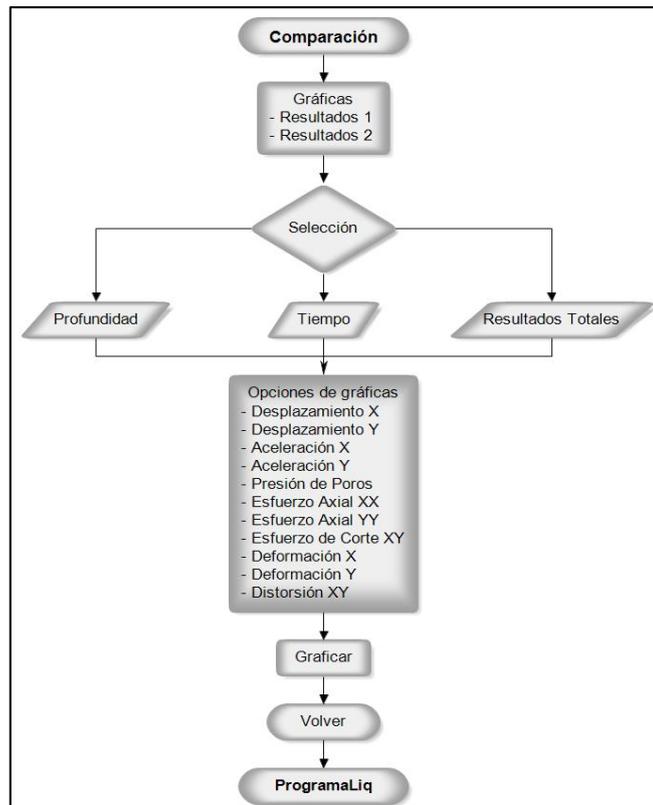


Figura 56. Flujograma de la interfaz de post – proceso: Comparación.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

La primera interfaz “Comparación” muestra dos zonas gráficas que exponen la respuesta de la columna en función del tiempo o la profundidad y la segunda interfaz “Licuefacción” representa curvas de esfuerzo – deformación y la variación del exceso de presión de poro. Como una tercera opción se incluye un proceso para exportar los datos íntegros obtenidos mediante el motor de análisis OpenSees.

La interfaz “Comparación” permitirá comparar dos gráficas a la vez y la visualización de los resultados completos de todos los parámetros medidos durante el análisis, o puede limitarse a un instante de tiempo o de profundidad en particular. Su funcionamiento se describe en el flujograma de la Figura 56.

La segunda interfaz, “Licuefacción”, se ha establecido para mostrar las deformaciones relacionadas al módulo de corte, la variación del exceso de presión de poro o de los esfuerzos efectivos durante toda la duración del análisis dinámico, esto en función de la profundidad de observación; además generar un reporte de los resultados más relevantes. Esta interfaz sigue los procesos mostrados en el flujograma de la Figura 57.

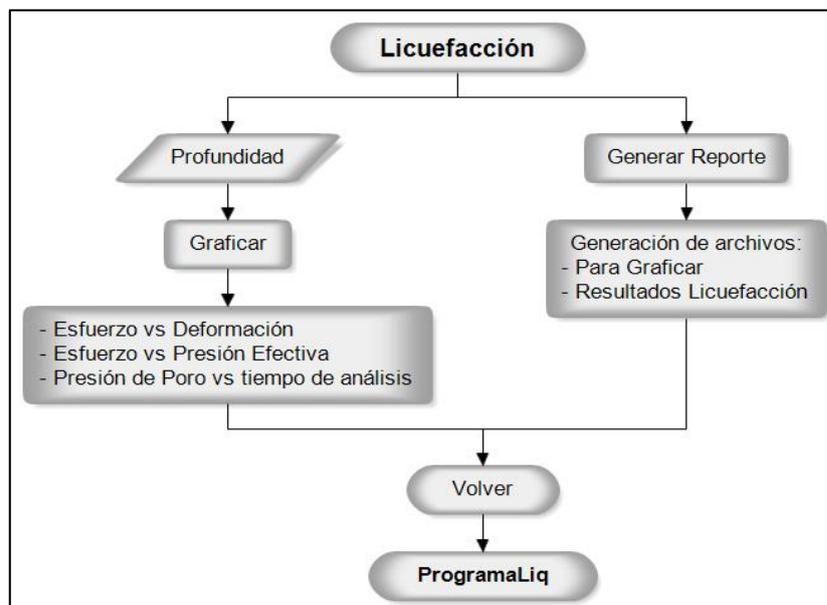


Figura 57. Flujograma de la interfaz de post – proceso: Licuefacción.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

En la Tabla 16 muestra un resumen de las gráficas que han sido definidas para mostrarse en las interfaces de la herramienta de post- proceso.

Tabla 16. Graficas disponibles en la herramienta de post-proceso.

<b>Interfaz: Comparación</b>	<b>Interfaz: Licuefacción</b>
Desplazamiento: ejes X y Y	Curva esfuerzo – deformación
Aceleración: ejes X y Y	Esfuerzo de corte – esfuerzo efectivo
Presión de poros	Exceso de presión de poro
Esfuerzos axiales: ejes X y Y	
Esfuerzos de corte: eje XY	
Deformación: ejes X y Y	
Distorsión: eje XY	

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.1.2.2.2. *Exportación de los resultados originales de OpenSees.*

Este proceso de exportación incluido en la sección de post – procesamiento de la herramienta (Figura 53) permitirá exportar los resultados íntegros que se obtienen en OpenSees durante las simulaciones estática y dinámica. Esto con el propósito de dar facilidad en la manipulación de los resultados originales, para permitir analizar e interpretar la respuesta de una columna de suelo afectada por cargas sísmicas fuera de las limitaciones o simplificaciones que se realizan durante el post – procesamiento de la herramienta informática generada.

## 3.2. Validación de la herramienta.

Jefferies & Been (2015) se refieren al proceso conveniente de validación de los modelos numéricos con elementos finitos: en primer lugar, sirve para verificar la precisión con que un software resuelve los modelos analizados; en segundo lugar, permite comprobar que el código y sus complementos están correctamente compilados y funcionales.

Cuando se emplea modelos numéricos para representar escenarios reales, es bastante común que estas aproximaciones matemáticas caracterizadas por simplificar las condiciones de un sistema no estén cerca de simular un comportamiento fiel o aceptable de dichos escenarios. Una modelación numérica debe tener bien definidas sus condiciones de borde y escenarios para las cuales deja de ser aplicable.

### 3.2.1. Proceso de validación.

Dada la gran importancia del proceso de validación de un software, la herramienta informática desarrollada se ha utilizado para simular una serie de escenarios que permitan validar el funcionamiento y precisión de los resultados obtenidos.

La metodología implementada para este proceso de validación se describe en la Figura 58. En donde, el modelo numérico original de OpenSees que se encuentra debidamente validado por sus desarrolladores, es empleado para validar la herramienta informática. Esto se logra a

través de una comparativa entre el código original, el código generado y la herramienta de pre y post – proceso.

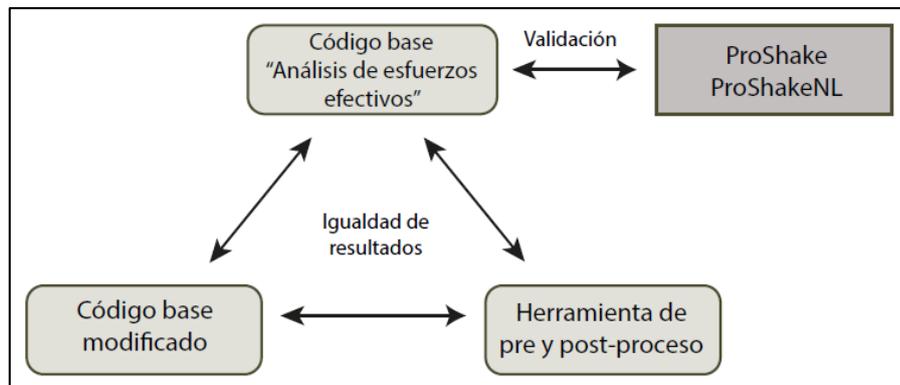


Figura 58. Metodología de validación de herramienta de pre y post-proceso.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

La modelación numérica original de OpenSees está validada por sus desarrolladores mediante el software comercial “Proshake” y “ProShakeNL” emplea modelos numéricos (respuesta de sitio Lineal Equivalente y No-Lineal en una dimensión).

Por tanto, la validación de la herramienta informática se desarrollará a través del siguiente proceso: la comparación de los resultados obtenidos para determinadas modelaciones entre el código original y el código generado, luego los resultados mediante el código generado y la herramienta informática, finalmente se evaluará el código original con la herramienta informática. Los resultados de este proceso se resumen en la sección 4.2 del capítulo de Análisis de Resultados, mientras que en el Anexo B.ii pueden revisarse las gráficas de cuatro escenarios planteados para la validación.

### 3.3. Definición de los escenarios para análisis de la licuefacción.

Dentro de los objetivos de esta investigación se propone analizar la licuefacción de suelos y determinar la incidencia de ciertas variables en la activación del fenómeno a partir de la generación de la herramienta informática. Entonces se han establecido 14 escenarios de columna de suelo que resultan de la permutación de dichas variables, las cuales se describen en los siguientes apartados. Las variables establecidas se dividen en dependientes e independientes; las dependientes corresponden a las variables que la herramienta requiere durante el pre-proceso para realizar el análisis mediante OpenSees, las variables independientes son las que permiten evaluar la licuefacción de suelos.

#### 3.3.1. Variables dependientes.

Las variables dependientes se resumen en el tipo de suelo con sus respectivas propiedades geotécnicas, las propiedades geométricas de la columna de suelo, el nivel freático y la carga sísmica, que se describen a continuación.

### 3.3.1.1. Tipo de suelo y propiedades geotécnicas del suelo.

De acuerdo con los análisis de Tsuchida (1970), los suelos más susceptibles a la licuefacción son los que tienen a la fricción como determinante de la resistencia a la deformación, lo cual ha centrado las investigaciones de la licuefacción en los suelos compuestos por arenas limpias, que contienen poca o nula cantidad de finos (Figura 59). Para la presente investigación se ha seleccionado a las arenas como tipo de suelo para el análisis de licuefacción, no obstante, la herramienta informática generada permite realizar dicho análisis para suelos no cohesivos en general.

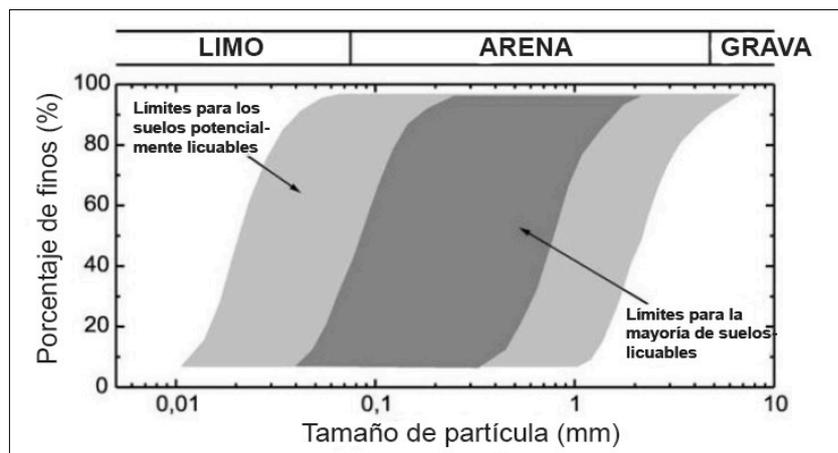


Figura 59. Rangos de distribución del tamaño del grano para suelos licuables.

Fuente: Tsuchida, 1970.

Elaboración: Los Autores.

#### 3.3.1.1.1. Densidad relativa y relación de vacíos.

Resultados de pruebas de laboratorio y observaciones en campo, han demostrado que la densidad relativa y con ella, la relación de vacíos inicial, son dos de los factores más importantes que inciden en la licuefacción de suelos, de acuerdo con el Geotechnical Engineering Bureau (2015). En rangos menores al 50% de densidad relativa en arenas saturadas limpias y arenas limosas se produce la licuefacción de suelos, y más allá de densidades relativas de 75% no se presenta, con estos antecedentes, para la presente investigación se han propuesto cinco categorías de densidad relativa para arenas saturadas limpias, al igual que valores para la relación de vacíos, seleccionando un promedio del rango establecido por categoría, como se puede ver en la Tabla 17. A partir de las categorías de densidad relativa seleccionadas se establecen otros parámetros geotécnicos del suelo, necesarios para el análisis de licuefacción de suelo.

Tabla 17. Categorías de densidad relativa.

Consistencia	Densidad Relativa, $D_r$ (%)		Relación de vacíos, $e$	
	Rango	Valor seleccionado	Rango	Valor seleccionado
Muy Flojo	0 – 40	20	> 0,9	0.95
Flojo	40 – 60	50	0,65 - 0,9	0.75
Medianamente Denso	60 – 80	70	0,55 - 0,65	0.6
Denso	80 – 90	85	0,4 - 0,55	0.48
Muy Denso	90 - 100	95	< 0,4	0.35

Fuente: Vallejo, 2002.

Elaboración: Los Autores.

### 3.3.1.1.2. Permeabilidad del suelo.

Sin datos disponibles de la permeabilidad del suelo de acuerdo a las categorías de densidad relativa de la arena, se tomó los valores recomendados por Yang, 2012 desde el sitio web de OpenSees, los cuales se pueden observar en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores recomendados de permeabilidad de varios suelos.

Grava	Arena	Arena Limosa	Limo	Arcilla
$>1.0 \times 10^{-1}$ cm/s ( $3.94 \times 10^{-2}$ in/s)	$1.0 \times 10^{-3}$ a $1.0 \times 10^{-1}$ cm/s ( $3.94 \times 10^{-4}$ a $3.94 \times 10^{-2}$ in/s)	$1.0 \times 10^{-5}$ a $1.0 \times 10^{-3}$ cm/s ( $3.94 \times 10^{-6}$ a $3.94 \times 10^{-4}$ in/s)	$1.0 \times 10^{-7}$ a $1.0 \times 10^{-5}$ cm/s ( $3.94 \times 10^{-8}$ a $3.94 \times 10^{-6}$ in/s)	$<1.0 \times 10^{-7}$ cm/s ( $3.94 \times 10^{-8}$ in/s)

Fuente: Yang, 2012.

Elaboración: Los Autores

### 3.3.1.1.3. Ángulo de fricción, módulo de corte, módulos volumétricos.

Los valores de ángulo de fricción, módulo de corte, módulo de bulk, entre otros que se seleccionaron, corresponden a los suelos no cohesivos con densidades relativas desde muy flojas a muy densas, los cuales se aproximan a los valores recomendados para el material que requiere el modelo generado de la investigación, como se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores recomendados de densidades, módulo de corte, módulo de bulk, módulo volumétrico y ángulo de fricción.

Parámetro	Símbolo	Observación	Valores Recomendados				
Densidad relativa del suelo	$D_r$		30%	40%	50%	60%	75%
Densidad	$\rho$	Densidad in situ de la masa de suelo	1.7 ton/m <sup>3</sup>	1.8 ton/m <sup>3</sup>	1.9 ton/m <sup>3</sup>	2.0 ton/m <sup>3</sup>	2.1 ton/m <sup>3</sup>
Módulo de corte	$G_r$		6e4 kPa	9e4 kPa	10e4 kPa	11e4 kPa	13e4 kPa
Módulo de Bulk (volumen) de referencia	$B_r$	Módulo volumétrico de referencia que se especifica a partir de la presión de confinamiento efectiva $P_r$ del suelo	16e4 kPa	22e4 kPa	23.3e4 kPa	24e4 kPa	26e4 kPa
Módulo volumétrico combinado no drenado	$B_c$	Relaciona los cambios en la presión de poro y la deformación volumétrica, puede ser aproximado por: $B_c \approx B_f/n$ , donde $B_f$ es el módulo volumétrico de la fase fluida (2.2xe6 kPa (o 3.191xe5 psi) para el agua), y $n$ es la porosidad inicial.	4.516e6 kPa	5.133e6 kPa	5.867e6 kPa	6.783e6 kPa	8.486e6 kPa
Ángulo de Fricción	$\phi$		31°	32°	33.5°	35°	36.5°

Fuente: Yang, 2014. Recuperado de: <https://goo.gl/QwQNAU>.

Elaboración: Los Autores

#### 3.3.1.1.4. Velocidad de onda de corte.

De igual forma para la asignación de valores de la velocidad de onda de corte para las cinco categorías que se tiene de las densidades relativas de la arena, se realizó una correlación a partir de los valores proporcionados por Das & Ramana (2010), los cuales se visualizan en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de velocidad de ondas de compresión y de corte para varios suelos.

Tipo de Suelo	Velocidad de ondas de compresión, $V_p$ (m/s)	Velocidad de ondas de corte, $V_s$ (m/s)
Arena Fina	300	90 - 150
Arena Densa	460	230
Grava	762	180 - 215
Arcilla húmeda	1220 - 1370	150
Granito	3960 - 5490	2130 - 3350
Arenisca	1370 - 3960	610 - 2130

Fuente: Das & Ramana, 2010.

Elaboración: Los Autores.

De acuerdo a experimentaciones en el Imperial Valley, California, cuanto mayor sea el valor de la velocidad de las ondas de corte del suelo y menor sea la aceleración máxima en el sitio, si se tienen las mismas condiciones del lugar de las experimentaciones, se puede considerar ciertas correlaciones que se muestran en la Figura 60, para determinar si el suelo podría licuar

o no (García Núñez, 2007; Obando, 2009), criterios que se tendrá en cuenta al momento de evaluar el fenómeno de licuefacción.

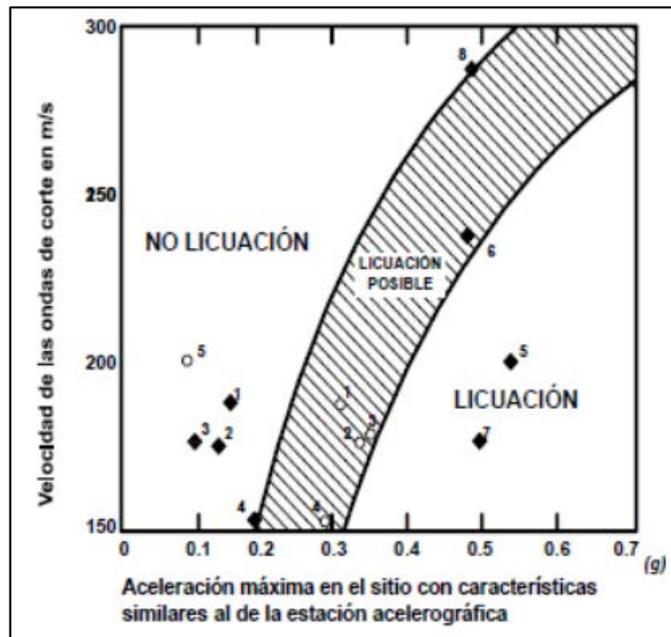


Figura 60. Relación de la velocidad de onda de corte y aceleración máxima para condiciones similares del Imperial Valley, California.

Fuente: Obando, 2009.

Elaboración: Los Autores.

#### 3.3.1.1.5. Otros factores.

Existen otros factores que tienen relevancia no tan significativa en la activación de la licuefacción de suelo, que son la forma de grano, distribución granulométrica, el coeficiente de uniformidad, índice de plasticidad, grado de saturación, entre otros (Geotechnical Engineering Bureau, 2015; Vallejo, 2002), éstas propiedades no son requeridas en la herramienta generada para la modelación de los escenarios propuestos, por lo tanto no se han considerado para el análisis.

#### 3.3.1.1.6. Resumen de las propiedades geotécnicas.

Se presenta las propiedades geotécnicas en función de la consistencia del tipo de suelo seleccionado, en la Tabla 21. Cabe recalcar que los valores correspondientes a estos parámetros son los que se pide como información de ingreso en la herramienta, en la sección del pre-proceso, no obstante, existen variables adicionales que su selección depende del valor de la densidad relativa que se ingrese por estrato, y fueron programadas mediante una correlación de la Tabla 12.

Tabla 21. Resumen de propiedades geotécnicas de los estratos de suelo establecidas para el ingreso de información en la interfaz de pre-proceso.

Propiedad			Consistencia del Suelo				
Descripción	Símbolo	Unidad	Muy Flojo	Flojo	Medianamente Denso	Denso	Muy Denso
Densidad relativa del suelo	$D_r$	%	20	50	70	85	95
Densidad	$\rho$	Ton/m <sup>3</sup>	1.564	1.743	1.878	1.963	2.067
Módulo de corte	$G_r$	kPa	6.400E+04	9.400E+04	1.100E+05	1.335E+05	1.460E+05
Módulo de Bulk (volumen) de referencia	$B_r$	kPa	1.600E+05	2.255E+05	2.400E+05	2.650E+05	2.800E+05
Módulo volumétrico combinado no drenado	$B_c$	kPa	4.516E+06	5.133E+06	5.867E+06	6.783E+06	8.486E+06
Ángulo de Fricción	$\phi$	Grados	31	32	35	37	39
Relación de vacíos	$e$	Adim	0.95	0.75	0.60	0.48	0.35
Permeabilidad Vertical	$V_{perm}$	m/s	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
Permeabilidad Horizontal	$H_{perm}$	m/s	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-04
Velocidad de la onda de corte	$V_s$	m/s	100	150	190	220	250

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.3.1.2. Geometría de la columna de suelo.

Además de las propiedades geotécnicas, que dependen de la selección de la densidad relativa del suelo, se tiene otro tipo de variables dependientes que corresponden a las propiedades geométricas de la columna de suelo. En estas propiedades se incluye a la pendiente del terreno, altura, ancho y estratificación de la columna de suelo, donde éstas tres últimas tienen su influencia, para realizar el mallado correspondiente a la modelación de la columna.

#### 3.3.1.2.1. Altura.

Más allá de los 15 m de profundidad es menos probable que se licúe el suelo según Vallejo, (2002). Se ha propuesto como valores de alturas de la columna de suelo de 15 m para todos los casos de ubicación del nivel freático. Además se propone otras dos alturas de columna de suelo, de 30 m y 60 m para determinadas ubicaciones del nivel freático, en todas ellas al seguir las estratificaciones que se presentan en la Figura 61 y para las variaciones de nivel freático propuestas en la sección 3.3.1.3.

### 3.3.1.2.2. Ancho.

El ancho de la columna de suelo, será para todos los escenarios propuestos de la columna de suelo de 2 m, como recomendación del modelo base de la investigación.

### 3.3.1.2.3. Pendiente.

Para todos los escenarios de columnas de suelo, se ha utilizado una pendiente de 0%, sin embargo, no se ha limitado la variación de este parámetro en la herramienta informática, con la condición de que la pendiente de la columna de suelo sea menor al ángulo de reposo del suelo en consideración, para efectividad del análisis estático y a su vez del análisis dinámico.

### 3.3.1.2.4. Estratificación del suelo.

Se ha planteado escenarios de columna de suelo con una estratificación uniforme, creciente y decreciente para combinaciones de uno estrato y de dos estratos como se muestra en la Figura 61. Ciertos métodos empíricos han determinado que la licuefacción se manifiesta cuando se cumple que el espesor de un estrato superior, considerado como no licuable, es menor a 8 m; y las relaciones entre profundidades de los estratos licuable y no licuable sea menor a la unidad (García Núñez, 2007). Se ha seleccionado escenarios de dos estratos con asociaciones de estratos decrecientes y crecientes, que cumplen dichas condiciones, además de las estratificaciones del tipo uniforme para evaluar el fenómeno de licuefacción.

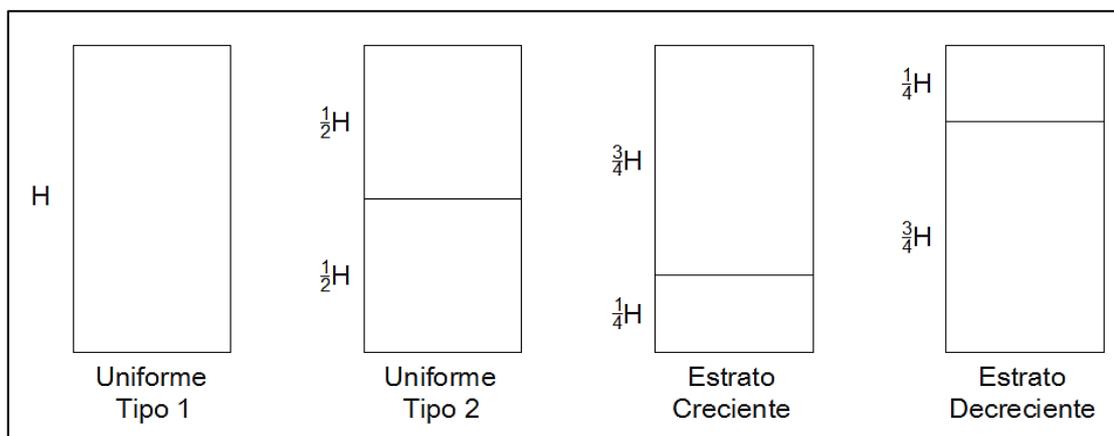


Figura 61. Tipos de estratificación del suelo para los escenarios empleados en la investigación.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.3.1.3. Nivel freático.

Vallejo (2002) estableció que la licuefacción de suelos se ha presentado cuando la profundidad del nivel freático se encontraba en valores menores que 3 m, más profundo que 5 m la probabilidad de activar la licuefacción muy baja. Además, Das & Ramana, (2010) presentaron que la profundidad crítica de la licuefacción, descrita como la profundidad desde la superficie del terreno, donde se genera el fenómeno es de aproximadamente 6.0 m a ubicaciones del nivel freático entre 0 m a 3 m, y de aproximadamente 9 m cuando el nivel

freático se ubica a 4.5 m aproximadamente. La profundidad del nivel freático se ha variado de acuerdo a las alturas de columna de suelo:

Para la altura de columna de suelo de 15 m, se propuso en la estratificación uniforme variar el nivel freático para obtener un estado completamente saturado (0H), parcialmente saturado ( $\frac{1}{4}$ H), de saturación media ( $\frac{1}{2}$ H) y seco (1H), teniendo en cuenta que el nivel freático se mide desde la superficie del terreno. Para las asociaciones de estratos crecientes se tiene variaciones del nivel freático en la altura de 15 m de la columna de suelo a 0H,  $\frac{1}{4}$ H y  $\frac{1}{2}$ H y para la estratificación decreciente se tiene únicamente el nivel freático en un estado completamente saturado.

En las alturas de la columna de suelo de 30 m y 60 m solo se tiene asociación de estratos tipo uniforme. Para la altura de 30 m de columna de suelo se tiene ubicaciones del nivel freático a 0H,  $\frac{1}{4}$ H y  $\frac{1}{2}$ H y en la altura de 60 m, variaciones a 0H, y  $\frac{1}{2}$ H.

Cabe recalcar que la disposición del nivel freático en la columna de suelo, cuando éste es superficial que conforma un estado completamente saturado (0H), para efectos del uso de la herramienta, el nivel freático se ubica en realidad a 0.50 m desde la superficie del terreno, independientemente de la altura de la columna de suelo; de igual forma, cuando la columna de suelo está seca (1H), se propone un nivel freático de 0.50 m, para toda la columna de suelo, medido desde la profundidad total de la misma hacia la superficie del terreno.

#### **3.3.1.4. Carga sísmica.**

Se seleccionó el sismo reciente de mayor importancia ocurrido en el país, como carga sísmica para la experimentación. Este se refiere al sismo de Pedernales con magnitud de 7.8 ocurrido el 16 de abril del 2016 a 20 km de profundidad (Figura 62), que se normalizó respecto al valor máximo de aceleración. Según Vallejo (2002) los sismos de magnitud igual o mayor a 5.5, con aceleraciones iguales o mayores a 0.20 g generan licuefacción, entonces, para aplicación de la carga sísmica en consideración se seleccionó 5 tipos intensidades en la Escala de Mercalli, entre ellas se tiene las categorías que se incluyen en la Tabla 22:

Tabla 22. Intensidades de sismo seleccionadas para el análisis.

Potencial de Daño	PGA (g)
Muy leve	0.065
Moderado	0.25
Moderado a intenso	0.5
Intenso	0.95
Muy intenso	1.41

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

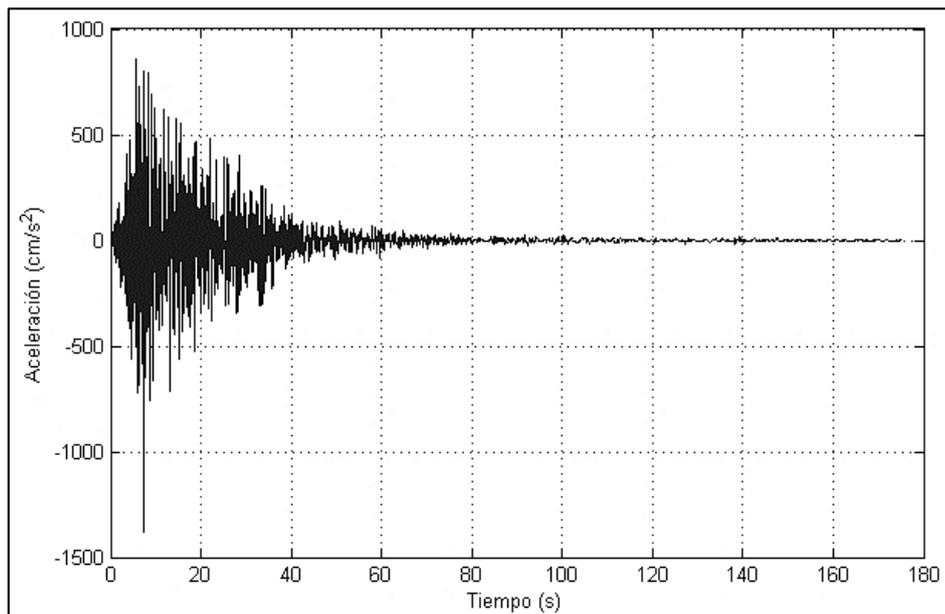


Figura 62. Registro de aceleración en  $\text{cm/s}^2$  del Sismo de Pedernales, Ecuador 2016.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 3.3.2. Variables independientes.

En la presente investigación, para el análisis de licuefacción de suelos, se utilizará tres principales variables que permitan realizar una evaluación del fenómeno, las cuales son la relación de presión de poros, el desplazamiento y la resistencia al corte, que siguen los criterios de García Núñez (2007) y Seed (1987) descritos a continuación.

#### 3.3.2.1. Relación de presión de poros.

Dentro de las variables que permiten determinar el índice de licuefacción, se tiene a la tensión efectiva y a la presión de poros. Para determinar si un suelo ha licuado, la relación que exista entre la presión de poros respecto a la tensión efectiva o presión de confinamiento deberá ser igual o mayor a la unidad según García Núñez (2007), en cambio Seed H. Bolton (1987) de acuerdo a sus investigaciones considera que los valores altos de presión de poros no necesariamente deben igualar a la tensión efectiva inicial sino que es suficiente una relación de presión de poros de 0.60 para activar la licuefacción inicial del suelo. Si el suelo no presenta

licuefacción al no desarrollar una relación de presión de poros alta, entonces no se tendrá problemas de deslizamiento debido a la elevada resistencia al corte que el suelo mantiene y no existirán problemas serios de deformación (Seed H. Bolton, 1987). Bajo estos dos criterios se apoya el análisis de licuefacción de suelos que se realizará mediante la herramienta informática, con la interfaz de post – proceso.

### **3.3.2.2. Desplazamiento.**

Cuando la presión de poros se incrementa de tal forma que iguala a la presión de confinamiento se tiene que el suelo experimentará grandes desplazamientos (García Núñez, 2007). Siempre y cuando los registros de desplazamiento cumplan dicha condición, se tomarán como indicio de la activación de la licuefacción de suelos.

### **3.3.2.3. Resistencia al corte.**

Durante la licuefacción de suelos, la tensión efectiva disminuye y consiguientemente se reduce la resistencia al corte de la arena (García Núñez, 2007), entonces se registrará de los escenarios propuestos la reducción en porcentaje de éste parámetro para determinar si un suelo ha licuado.

### **3.3.3. Descripción de escenarios y modelos analizados.**

Con el fin de cumplir con el segundo objetivo específico de esta investigación mediante el uso de la herramienta generada, se han propuesto 14 escenarios de columnas de suelo, que resultan de la permutación de las variables dependientes mencionadas anteriormente, y que se describen brevemente a continuación.

El escenario 1 corresponde a 25 modelaciones, con altura de la columna de suelo de 15 m y estratificación Uniforme tipo 1, en las que se ha variado las categorías de densidad relativa para las 5 intensidades de sismo. A partir del escenario 2, en cada escenario se tiene 100 modelos que resultan de la variación de las 5 categorías de densidad relativa tanto del estrato inferior como superior, de los que se obtiene un total de 25 variaciones que además se analizan para 4 intensidades de carga sísmica.

Dentro de la categoría de estratificación uniforme, se tiene dos tipos; será Tipo 1 cuando la densidad relativa del estrato inferior tenga igual valor a la del estrato superior y será estratificación uniforme Tipo 2 cuando esos valores de densidad relativa sean distintos. Todos los modelos de los escenarios, tendrán un ancho de columna de suelo de 2 m y pendiente del suelo de 0%, dependiendo de la altura de la columna se tiene su respectiva asociación de estratos y la modificación en la ubicación del nivel freático, se obtienen en total 1325

modelaciones con las permutaciones de las variables dependiente en todos los escenarios. Un resumen de las variables consideradas por cada escenario se incluye en la Tabla 23.

Tabla 23. Escenarios y sus respectivas características, propuestos para el análisis de la licuefacción de suelos.

Escenario	Altura (m)	Ancho (m)	Pendiente (%)	Estratificación	Nivel freático	Carga Sísmica
1	15	2	0	Uniforme	0 H	0.065g, 0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
2	15	2	0	Uniforme	0 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
3	15	2	0	Uniforme	1/4 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
4	15	2	0	Uniforme	1/2 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
5	15	2	0	Uniforme	1 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
6	15	2	0	Creciente	0 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
7	15	2	0	Creciente	1/4 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
8	15	2	0	Creciente	1/2 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
9	15	2	0	Decreciente	0 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
10	30	2	0	Uniforme	0 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
11	30	2	0	Uniforme	1/4 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
12	30	2	0	Uniforme	1/2 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
13	60	2	0	Uniforme	0 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g
14	60	2	0	Uniforme	1/2 H	0.25g, 0.5g, 0.95g y 1.41g

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

**CAPÍTULO IV:  
ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Este capítulo contiene los resultados alcanzados para cumplir con los objetivos propuestos en la presente investigación: la creación de una herramienta informática para modelar el fenómeno de licuefacción y la evaluación del mismo a través de los escenarios definidos por los autores para emplear la herramienta creada.

Se describirá las funcionalidades de la herramienta informática de pre y post proceso, así mismo, los resultados obtenidos en el proceso de validación y los resultados de los escenarios propuestos para el análisis de licuefacción de suelos.

Los resultados de esta la evaluación del potencial de licuefacción se representarán mediante gráficas indicativas de los principales parámetros medidos con la herramienta creada, tales como: incremento de presión de poro, esfuerzos, deformaciones y desplazamiento de la columna de suelo, entre otros.

#### 4.1. Herramienta para evaluación del potencial de licuefacción.

Se ha generado una herramienta para evaluar el fenómeno de licuefacción mediante modelos numéricos que facilita la creación de múltiples escenarios de columna de suelo y la aplicación de una carga sísmica para analizar los resultados obtenidos mediante gráficas y reportes de los parámetros más importantes de la licuefacción.

La herramienta se ha estructurado como se muestra en la Figura 63: se define un modelo de columna de suelo, que será simulado mediante el software OpenSees y para obtener resultados que serán mostrados a través de gráficas para la evaluación del fenómeno.

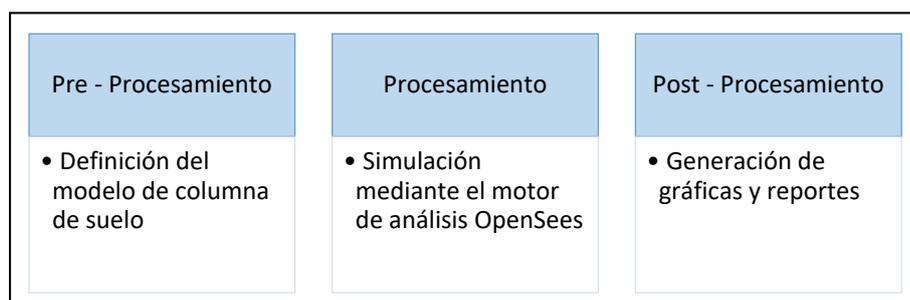


Figura 63. Proceso de modelación mediante la herramienta informática.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

##### 4.1.1. Herramienta de pre-proceso.

La herramienta de pre – proceso contiene dos interfaces llamadas: “ProgramaLiq” y “Estratos”. La interfaz principal “ProgramaLiq” se desarrolló para obtener la información geométrica de la columna de suelo y la carga sísmica que se empleará durante la modelación; y la interfaz secundaria “Estratos”, permite obtener la información geotécnica de cada estrato que conforman la columna de suelo. Entre las dos interfaces se genera los archivos de texto con la información necesaria para el análisis mediante OpenSees de la columna de suelo.

Desde la interfaz inicial “ProgamaLiq” se tiene acceso a todas las utilidades y funciones de la herramienta, se muestra en la Figura 64. Se encuentra dividida en cuatro secciones dedicadas a obtener la información sísmica, geométrica de la columna de suelo y de la roca madre que la soporta, que se explican a continuación.

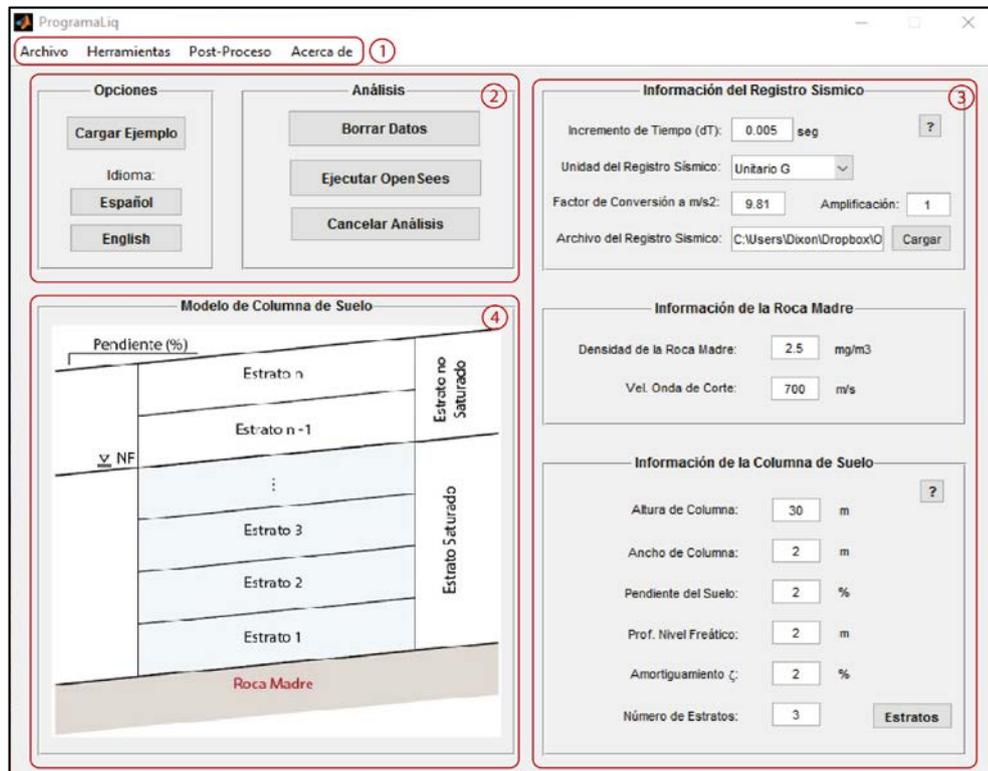


Figura 64. Interfaz principal de la herramienta de pre – proceso.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

- Sección 1: La primera sección corresponde a la barra de menús de la herramienta, como se muestra integrada en la Figura 65. El menú ‘Archivo’ permite restituir desde cero la interfaz de análisis o cerrarla. El menú ‘Herramientas’ incluye la función de normalizar un registro sísmico de aceleraciones sobre su mayor valor registrado y la función de graficar la carga sísmica a emplearse durante el análisis. En ‘Post – Proceso’ se accede a las interfaces de post – procesamiento del análisis y a la opción de exportar los resultados obtenidos, el cual se habilita luego de finalizar el análisis. En el menú ‘Acerca de’ se tiene información sobre el análisis que realiza la herramienta, el método de generación del modelo de elementos finitos e información de los autores.

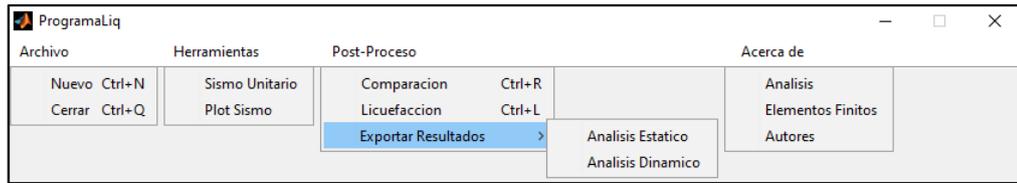


Figura 65. Elementos en la barra de menús de la herramienta generada.  
 Fuente: Los Autores.  
 Elaboración: Los Autores.

- Sección 2: Está conformada por todos los elementos que son necesarios para construir el modelo de elementos finitos. Aquí se pueden diferenciar apartados dedicados a la carga sísmica a emplearse durante el análisis, la información de la roca madre subyacente, los parámetros geométricos y los botones que dan acceso al registro de los parámetros geotécnicos, iniciar el análisis o cargar un ejemplo base.
- Sección 3: Corresponde a la selección del idioma en que la herramienta se muestra, por defecto aparece en español y puede modificarse a inglés. El cambio de idioma afecta a todas las interfaces, botones de ayuda y complementarios de la herramienta.
- Sección 4: Se muestra un esquema general de la estructura que la herramienta permite generar de una columna de suelo: los múltiples estratos, la ubicación variable del nivel freático, la pendiente del suelo, su ancho y altura.

La interfaz secundaria de la herramienta de pre – proceso se muestra en la Figura 66; está conformada por 4 secciones establecidas que se explican a continuación. En esta interfaz se incluye elementos de ayuda para la generación del modelo y la representación de la columna del suelo a analizarse.

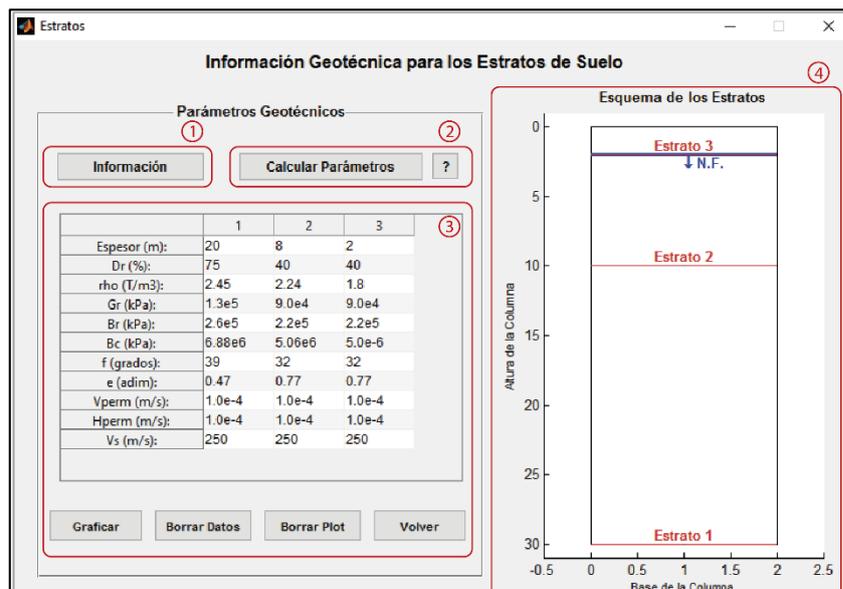


Figura 66. Interfaz secundaria de la herramienta de pre – proceso.  
 Fuente: Los Autores.  
 Elaboración: Los Autores.

- Sección 1: Conformada por el botón Propiedades, en esta sección se ofrece ayuda al usuario referente a los valores usuales de los parámetros geotécnicos requeridos en la interfaz secundaria, los que pertenecen a los mostrados en la Tabla 12.
- Sección 2: Se incluye la función de calcular los parámetros geotécnicos de la columna de suelo. Para ello se emplea la densidad relativa de cada estrato de la columna a modelarse para interpolar los restantes parámetros geotécnicos; la interpolación se realiza con los valores recomendados en el manual del software OpenSees (Tabla 12).
- Sección 3: Esta sección permite al usuario ingresar manualmente la información geotécnica de los estratos y es complementada por los botones que permiten graficar los estratos y la columna de suelo, borrar los datos ingresados o la gráfica generada.
- Sección 4: Corresponde al espacio donde se grafica el modelo de columna de suelo y permite al usuario reconocer algún error en la generación del modelo o aceptar el mismo y proceder al análisis.

Las opciones complementarias de la herramienta de pre – proceso están orientadas a facilitarle al usuario la modelación de la columna de suelo. Los botones de ayuda muestran información referente a cada sección en la que se encuentran, la herramienta se ha desarrollado con la posibilidad de alertar cuando hay datos faltantes, incongruentes o de formato diferente al esperado. Además, la opción de normalizar un registro sísmico incluida en la interfaz principal se muestra en la Figura 61a y la representación gráfica de la carga sísmica actuante durante el análisis en la Figura 61b.

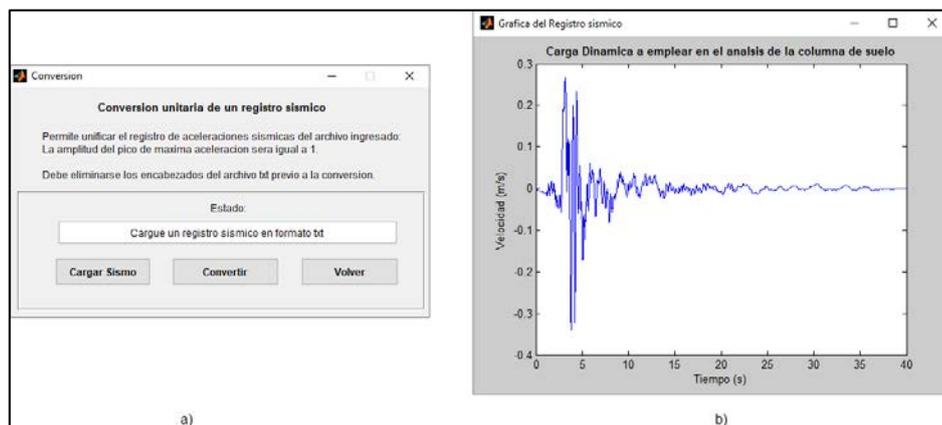


Figura 67. Funciones complementarias de la herramienta de pre – proceso.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.1.2. Herramienta de post-proceso.

El post – proceso del análisis de licuefacción en una columna de suelo se realiza mediante las interfaces denominadas “Comparación” y “Licuefacción”. En estas se puede representar gráficamente las variables más importantes del fenómeno y generar reportes en formato .txt con información resumida de los máximos valores registrados durante el análisis.

Se accede a las opciones de post – proceso a través de la interfaz “ProgramaLiq”. Los elementos de post – proceso son los siguientes: la interfaz “Comparación”, la interfaz de “Licuefacción” y la opción “Exportar Resultados”. Cada una de estas opciones se describe a continuación.

En la interfaz “Comparación” se genera simultáneamente dos gráficas de la columna de suelo, en ella se comparan diversos parámetros geotécnicos en función de las variables que el usuario requiera Figura 68; así, con esta herramienta se obtiene la ventaja de visualizar la evolución de la respuesta dinámica frente a cargas sísmicas de una columna de suelo en cualquier instante de tiempo o profundidad de observación.

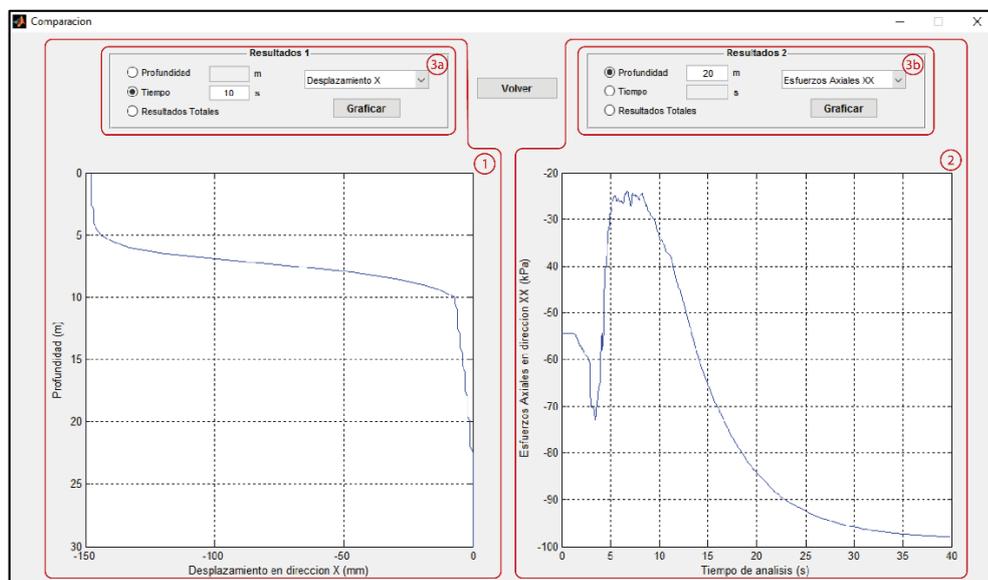


Figura 68. Interfaz de post – proceso: Comparación.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Esta interfaz se encuentra desarrollada de tal forma que puede distinguirse 3 secciones principales; sus funciones son las siguientes:

- Sección 1: Primer espacio para la representación de los resultados del análisis. Su configuración interna posee criterios para advertir cuando el usuario no ha ingresado valores o son de formato diferente al esperado, incluso cuando los datos ingresados superan el tiempo de análisis o la profundidad de la columna de suelo.
- Sección 2: Segundo espacio que permite representar los parámetros geotécnicos del análisis. Posee las mismas consideraciones que en la sección 1 para lograr una eficiente representación de los resultados post – proceso.
- Secciones 3a y 3b: En estas secciones se encuentran todos los controles para la graficar los resultados del análisis en sus respectivos espacios. En primer lugar, se pide la selección de la variable a representar: los resultados en un instante específico de tiempo, en una profundidad específica o los resultados totales del análisis. En

segundo lugar, las respuestas que se pueden graficar son el desplazamiento, aceleración, deformación, esfuerzos, presión de poro, entre otros. En la Tabla 24 se muestra las posibles representaciones que se pueden generar con la interfaz Comparación.

Tabla 24. Interpretación de los resultados del análisis con la interfaz Comparación.

Variable a representar	En función de	Respuesta graficada
Instante de tiempo específico	La altura total de la columna de suelo	Desplazamiento Aceleración
Profundidad específica de observación	Duración total del análisis	Presión de poro Esfuerzos axiales Esfuerzos de corte
Resultados Totales	Duración y altura total	Deformación Distorsión

Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

La interfaz “Licuefacción” permite representar la evolución de la columna de suelo durante todo el tiempo de análisis mediante gráficas de esfuerzo, deformación y exceso de presión de poro a la profundidad que el usuario defina (Figura 69). Adicionalmente, se tiene la posibilidad de generar un reporte con información resumida del análisis del fenómeno de licuefacción en una columna de suelo exportado como un archivo .txt.

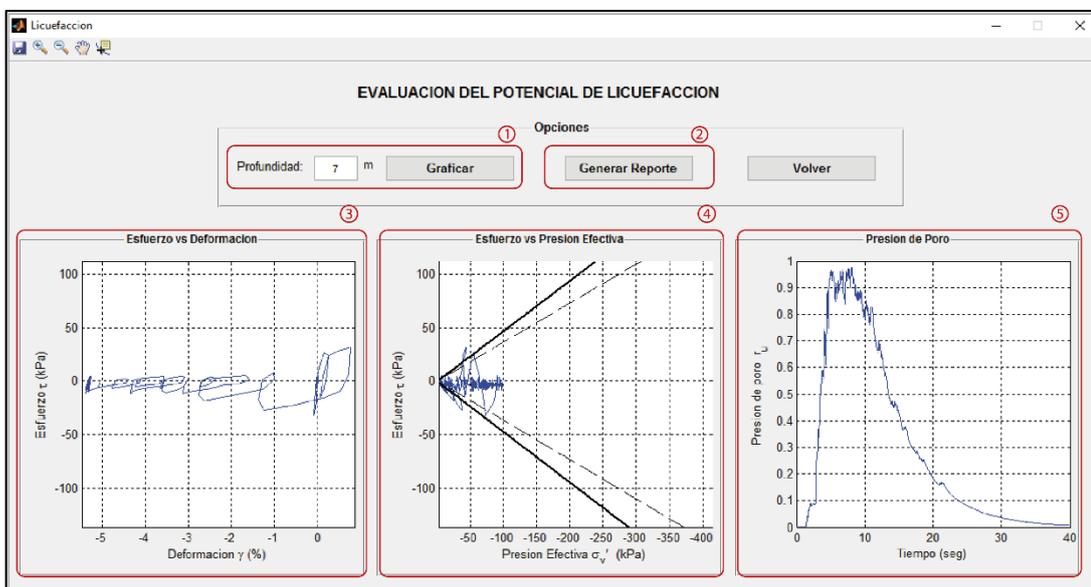


Figura 69. Interfaz de post – proceso: Licuefacción.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

La interfaz “Licuefacción” se divide en cinco secciones, las cuales, cada una de ellas se describen a continuación:

- Sección 1: Solicita al usuario ingresar un dato de profundidad de observación, al igual que en los casos anteriores, se ha implementado criterios para advertir cuando el usuario ingresa no ingresa valores, o bien, si estos no son del formato esperado.
- Sección 2: Permite generar dos reportes en formato .txt con los datos más importantes del análisis en relación al potencial de licuefacción de un suelo. El primer reporte denominado “Param\_Geotecnicos\_Reporte” contiene los valores máximos de desplazamiento, aceleración, exceso de presión de poro, esfuerzos y deformaciones, seguidos por el instante de tiempo y profundidad a la cual estos fueron registrados. En el segundo archivo “Zonas\_liq\_Reporte” se almacena la información referente a los instantes de tiempo durante el análisis en que la columna de suelo alcanzó valores límite para activar el fenómeno de licuefacción, así mismo, la altura inicial, final de la columna donde se presentó licuefacción y la altura total del suelo licuado.
- Sección 3: Muestra la evolución de la curva de esfuerzo – deformación de la columna de suelo durante el análisis a la profundidad indicada por el usuario.
- Sección 4: Es la variación de la curva de esfuerzo de corte – esfuerzo efectivo de confinamiento de la columna de suelo.
- Sección 5: Representa el comportamiento del exceso de presión de poro durante el análisis.

En la herramienta de post – proceso se ha incluido adicionalmente la posibilidad de exportar los datos íntegros generados por OpenSees para una interpretación y procesamiento manual por parte del usuario. Como se muestra en el menú Post – proceso de la Figura 65, la opción “Exportar Resultados” diferencia los archivos generados durante el análisis estático y el dinámico.

#### **4.2. Resultados del proceso de validación.**

La validación de la herramienta informática se establece mediante la ejecución de múltiples escenarios y la comparación de los resultados obtenidos. En la metodología se ha establecido el proceso para la validación de la herramienta, por tanto, los resultados obtenidos durante el mismo se muestran a continuación.

En este capítulo se muestra los resultados de la validación entre el código generado – modelo numérico base y herramienta informática – código generado, mediante un solo escenario para cada caso. En los Anexos A.ii “Resultados de la validación de la herramienta” se incluyen las gráficas de cuatro escenarios adicionales del proceso de validación.

##### **4.2.1. Validación del código generado.**

El código generado, al ser una aproximación matemática de un modelo real, plantea la necesidad de validar su funcionamiento antes de permitirse su uso en la evaluación del

fenómeno de licuefacción. Para esta validación se ha empleado los resultados publicados en el sitio web del código original de OpenSees. En la Figura 70 se muestra los resultados al ejecutar el mismo escenario en la herramienta creada y el código original.

El modelo de columna de suelo empleado para la validación está definido de la siguiente manera: 30 m de altura, 2 m de ancho, pendiente del 2 %, el nivel freático se encuentra a 2 m de la superficie y posee dos estratos, el primero de arena densa de 20 m de altura y ubicado en la parte inferior de la columna, el segundo estrato de arena suelta y de 10 m de altura, ubicado hacia la superficie.

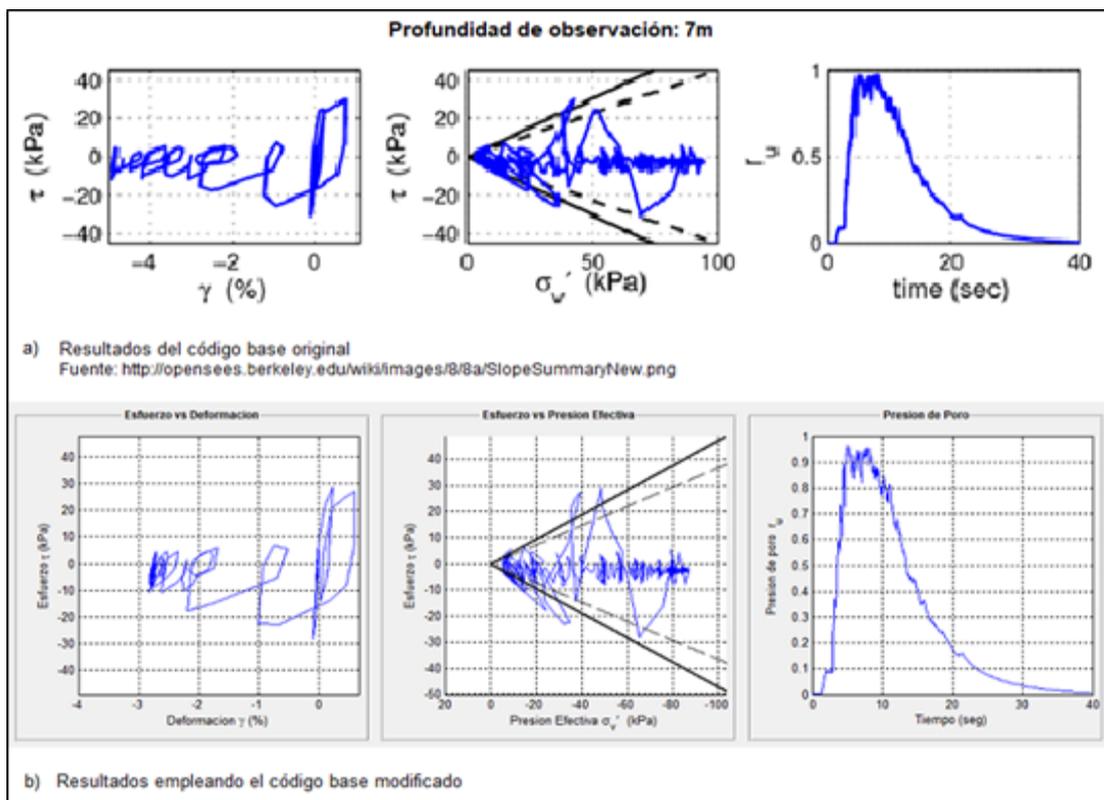


Figura 70. Comparación de los resultados al emplear el código base y el código generado.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.2.2. Validación de la herramienta informática.

La validación de los resultados al emplear la herramienta de análisis desarrollada se debe a la necesidad de verificar que los datos ingresados por el usuario sean correctamente interpretados por el software OpenSees durante el análisis. De la misma manera, a partir del código base modificado, el cual se ha validado, se desarrollan múltiples modelos de columna de suelo y se comparan los resultados obtenidos. En la Tabla 25 se muestra un resumen de los resultados numéricos obtenidos durante la validación.

Los modelos de columna de suelo para este escenario de validación se muestran en la Tabla 25. Con el modelo 1 se muestra la variación del desplazamiento a través del tiempo de análisis tanto en la parte inferior, central y superior de la columna de suelo. En la Tabla 26 los datos

en la parte izquierda han sido obtenidos con la herramienta implementada y los de la derecha con el código generado previamente validado. Con el modelo 2 se describe la variación de la presión de poro registrada durante el análisis en la parte inferior, central y superior de la columna modelada.

Tabla 25. Modelos de suelo para validación herramienta informática – código generado.

Propiedad	Modelo 1		Modelo 2		
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
Altura (m)	20	10	20	8	2
Pendiente (%)	2	2	2	2	2
Dr (%)	Arena firme 70%	Arena suelta 40%	Arena firme 70%	Arena suelta 35%	Arena muy suelta 20%

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 26, en el modelo 1 y 2 se puede apreciar la igualdad de resultados obtenidos mediante la herramienta informática y el código generado para todos los instantes de tiempo o altura de la columna de suelo; el margen de error en cada modelación se observa es del 0 %. De esta manera se valida los resultados obtenidos al emplear la herramienta informática generada en la presente investigación.

Tabla 26. Comparación entre los resultados obtenidos al emplear herramienta de análisis y el código generado.

Modelo de columna de suelo 1									
Tiempo (s)	Desplazamiento horizontal (mm)						Margen de error		
	Herramienta informática			Código generado			e = (x - y) · 100		
	Base	Centro	Superficie	Base	Centro	Superficie	Base	Centro	Superficie
0.005	-375.629	-375.641	-375.646	-375.629	-375.641	-375.646	0,00%	0,00%	0,00%
5.415	-376.025	-376.058	-376.936	-376.025	-376.058	-376.936	0,00%	0,00%	0,00%
10.65	-376.598	-376.643	-378.069	-376.598	-376.643	-378.069	0,00%	0,00%	0,00%
15.65	-376.814	-376.851	-378.240	-376.814	-376.851	-378.240	0,00%	0,00%	0,00%
21.115	-377.286	-377.323	-378.717	-377.286	-377.323	-378.717	0,00%	0,00%	0,00%
26.615	-377.777	-377.812	-379.202	-377.777	-377.812	-379.202	0,00%	0,00%	0,00%
32.105	-378.144	-378.181	-379.572	-378.144	-378.181	-379.572	0,00%	0,00%	0,00%
37.105	-378.540	-378.577	-379.968	-378.540	-378.577	-379.968	0,00%	0,00%	0,00%

Modelo de columna de suelo 2									
Tiempo (s)	Presión de Poro (kPa)						Margen de error		
	Herramienta informática			Código generado			e = (x - y) · 100		
	Base	Centro	Superficie	Base	Centro	Superficie	Base	Centro	Superficie
0.005	2.748.680	1.277.160	0.0000	2.748.680	1.277.160	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
5.415	4.083.190	2.318.820	0.0000	4.083.190	2.318.820	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
10.65	3.811.180	2.208.930	0.0000	3.811.180	2.208.930	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
15.65	3.648.310	2.140.420	0.0000	3.648.310	2.140.420	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
21.115	3.582.640	2.099.770	0.0000	3.582.640	2.099.770	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
26.615	3.517.420	1.960.500	0.0000	3.517.420	1.960.500	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
32.105	3.232.140	1.655.610	0.0000	3.232.140	1.655.610	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%
37.105	3.010.260	1.470.680	0.0000	3.010.260	1.470.680	0.0000	0,00%	0,00%	0,00%

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

### 4.3. Modelación numérica de los escenarios establecidos.

La validación de la herramienta generada da paso a la modelación de diversos escenarios para el análisis de la licuefacción de suelos. Se han propuesto 14 escenarios de columna de suelo que permitan identificar la influencia de las variables dependientes definidas en la metodología de la investigación, para la activación del fenómeno. En los siguientes apartados, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los 14 escenarios establecidos en el capítulo 3, Tabla 23.

#### 4.3.1. Escenario 1.

El escenario 1 representa una columna de suelo de 15 m de altura y 2 m de ancho, con pendiente de 0 %, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos uniformes Tipo 1. Esta columna de suelo pertenece al modelo 1 del escenario mencionado: categoría de arena de densidad relativa muy suelta ( $D_r = 20\%$ )

##### 4.3.1.1. Gráficas de desplazamiento.

La gráfica obtenida para este escenario (Figura 71) corresponde a los desplazamientos máximos en dirección horizontal de la columna de suelo, los cuales en la mayoría de modelos fueron obtenidos en la superficie de la columna de suelo, los valores completos se pueden visualizar de mejor manera en la tabla de resultados incluida en los Anexos de la investigación, sección B.i.

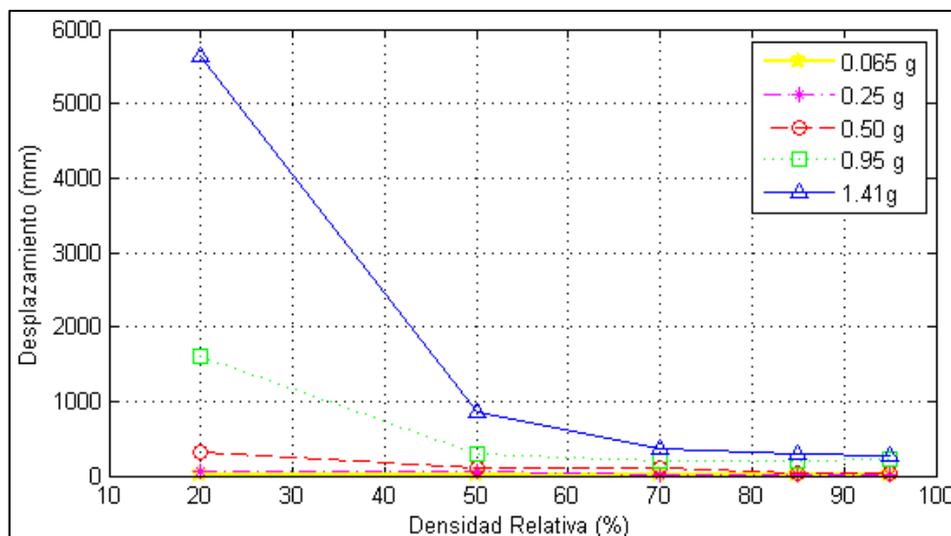


Figura 71. Desplazamientos máximos obtenidos para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

La Figura 71, representa los desplazamientos máximos obtenidos para el escenario 1, en función de la densidad relativa de los 25 modelos, y para cada intensidad de sismo. En ella

se puede visualizar que en su mayoría los desplazamientos son menores a 1 m, con excepción de los casos de densidad relativa muy suelta ( $D_r = 20\%$ ) para las cargas de 0.95 g y 1.41 g.

Al establecer los desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la altura de la columna de suelo, se puede demostrar en la Figura 72 que los dos casos de densidad relativa muy suelta, los desplazamientos representan aproximadamente el 10% y 37% de la altura de la columna de suelo, para las cargas de 0.95 g y 1.41 g respectivamente.

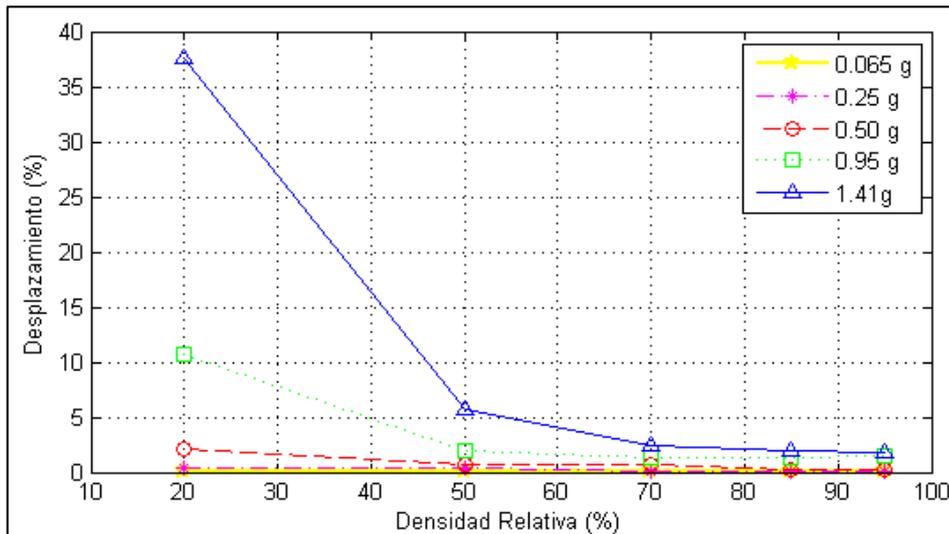


Figura 72. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo, para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.1.2. Gráfica de la relación de presión de poros.

Esta grafica indica la relación entre el exceso de presión de poros  $u$  y la tensión de confinamiento inicial del suelo, de igual forma que en la gráfica de desplazamiento, en la Figura 73 se incluye los valores máximos del escenario 1 para este parámetro.

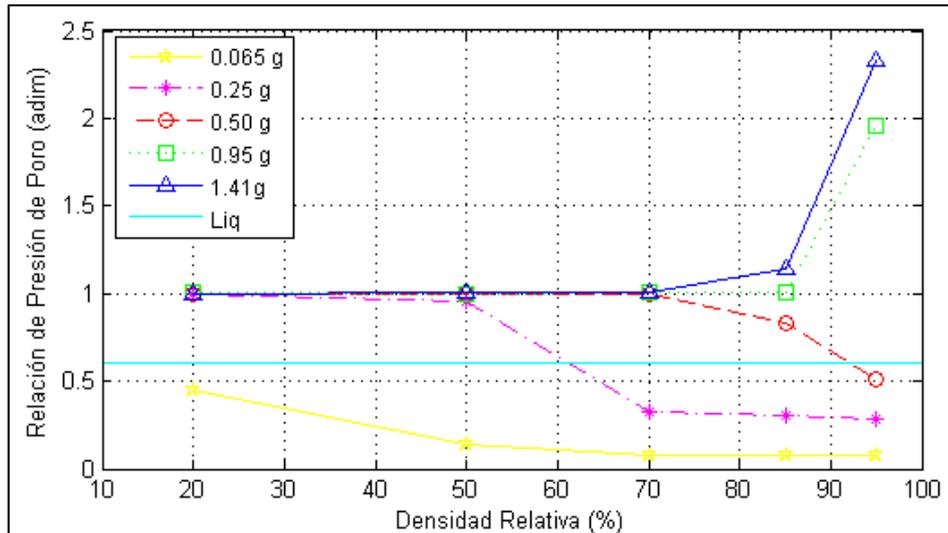


Figura 73. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 1, en función de la densidad relativa de toda la columna de suelo, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

De acuerdo a métodos empíricos, el límite de activación de la licuefacción que propone Seed (1987), es la relación de exceso de presión de poros superior a 0.60, el cual se muestra en la Figura 73 como una línea celeste. Con este enunciado, en la misma figura se observa que en la intensidad de sismo de 0.065 PGA ningún modelo del suelo activa la licuefacción, incluso para la intensidad de sismo superior de 0.25 PGA, los suelos más densos, de densidad relativa de 70 % en adelante, no activan la licuefacción del suelo. Bajo este primer resultado, se descartó la combinación de carga de 0.065 PGA para los demás escenarios.

En la Figura 73 se puede notar que existen dos casos extremos donde se presenta la licuefacción de suelos, en el modelo de densidad relativa de 95% para las intensidades de sismo más altas, se tiene que la relación de presión de poros es superior a la tensión de confinamiento inicial en aproximadamente 2 veces y 2.3 veces para las intensidades de 0.95 PGA y 1.41 PGA respectivamente.

A partir del escenario 2 las gráficas que se obtuvieron para la relación de presión de poros y desplazamiento en milímetros (mm) y porcentaje (%) de la altura de la columna de suelo fueron 5 en cada caso, las cuales se pueden observar en el apartado de Anexos de la investigación, sección B. Con las 5 gráficas respectivas de cada parámetro mencionado, se realizó una sola gráfica con 3 entradas de datos. Los escenarios tienen dos estratos con diferentes valores de densidades relativas, que siguen la siguiente disposición de ejes: el eje X corresponde a la densidad relativa del estrato inferior o estrato 1 de acuerdo a la entrada de datos en la herramienta informática, el eje Y tiene los datos de la densidad relativa del estrato superior, en el eje Z se ubican los resultados de los parámetros de desplazamiento o

de la relación de presión de poros, según corresponda, como se puede observar en la Figura 74.

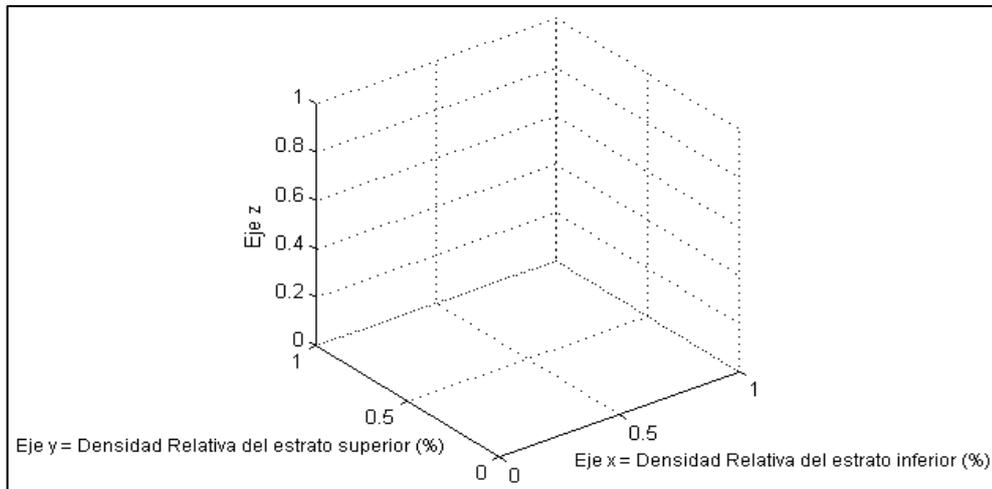


Figura 74. Esquema representativo de las gráficas de desplazamiento y relación de poros de los escenarios de la investigación  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.2. Escenario 2.

En el escenario 2 se ha establecido 15 m de altura y 2 m de ancho de columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2.

##### 4.3.2.1. Gráficas de desplazamiento.

En la Figura 75 se puede presenciar que los desplazamientos son considerables cuando el estrato superior tiene una densidad muy suelta ( $Dr = 20\%$ ) al aumentar la intensidad de carga. A partir de una intensidad de sismo de 1.41 g se tiene desplazamientos que superan los 2 m para todas las densidades relativas del estrato inferior con excepción de los modelos que tienen en el estrato más profundo una densidad suelta ( $Dr = 50\%$ ), donde los desplazamientos en su mayoría son menores a 1 m.

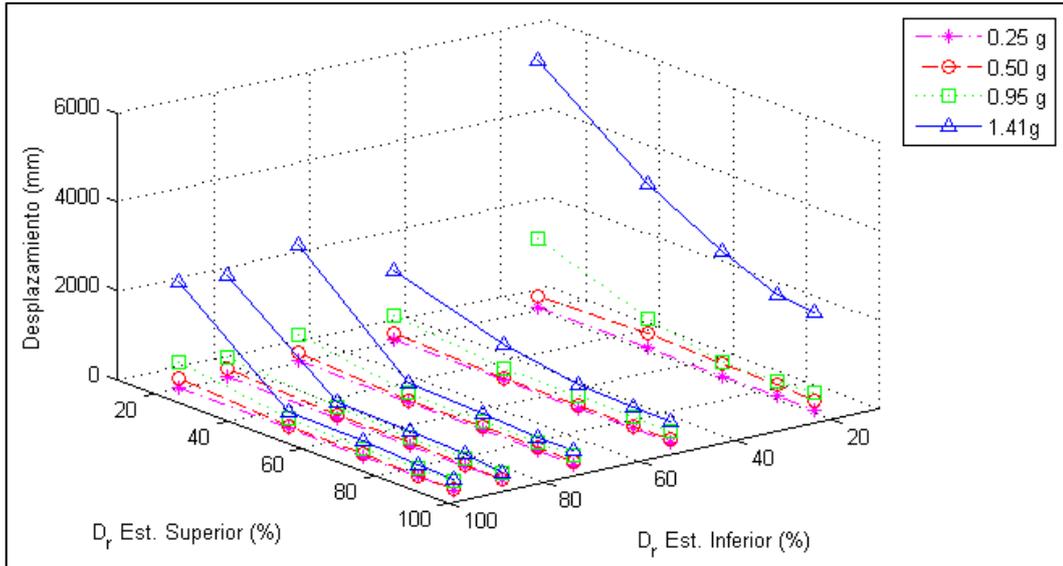


Figura 75. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 2, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Para el caso crítico de desplazamiento del escenario 2, correspondiente al modelo con densidades relativas muy sueltas ( $D_r = 20\%$ ) en sus dos estratos, se observa que el desplazamiento horizontal es aproximadamente un 36% de la altura de la columna de suelo. Los demás desplazamientos se mantienen menores al 17% del total de la altura de la columna, lo que se visualiza en la Figura 76.

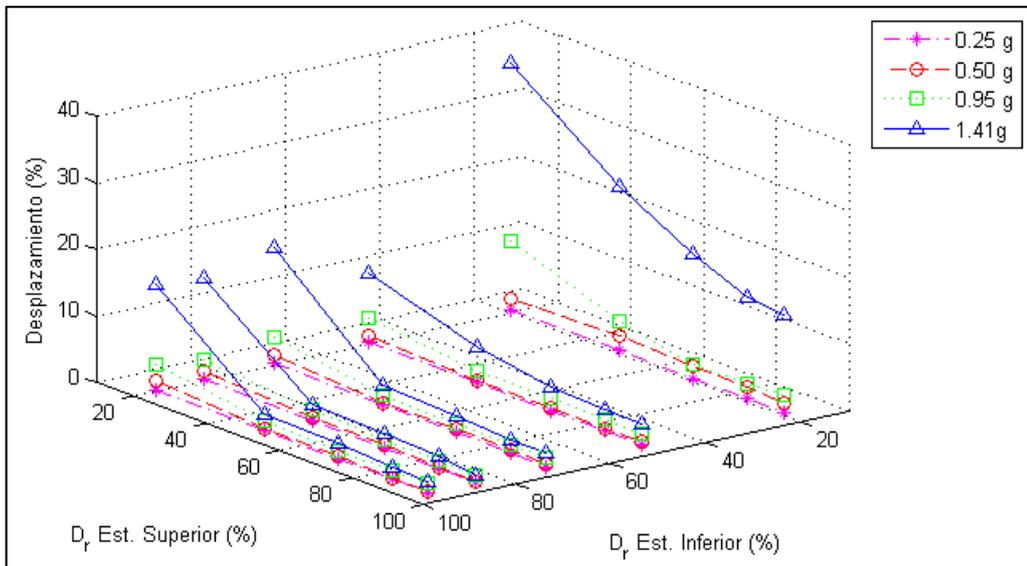


Figura 76. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 2, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.2.2. Gráficas de la relación de presión de poro.

Las gráficas de la relación de presión de poros, a partir del escenario 2, consisten en una superficie generada al interpolar los resultados de las modelaciones que componen cada escenario, y se agrupan de acuerdo a la intensidad de sismo. Cuando los valores de las relaciones de presión de poro adquieran un valor igual o mayor a 0.60, en el suelo de dichas modelaciones se activa la licuefacción (Seed, 1987) de forma similar que en el escenario 1, sin embargo, en estas figuras del escenario 2 en adelante, el límite de 0.60 en la relación de presión de poros se representa como una superficie plana de color celeste.

En la Figura 77 se observa que en combinaciones de estratos con densidad relativa menor al 50%, independientemente de la intensidad del sismo, todos los modelos de columna de suelo licúan. Para intensidades superiores a 0.50 g todos los casos presentan licuefacción, sin embargo, para el caso de intensidades de sismo de 0.25 g, los modelos que poseen estratos más densos no presentan licuefacción.

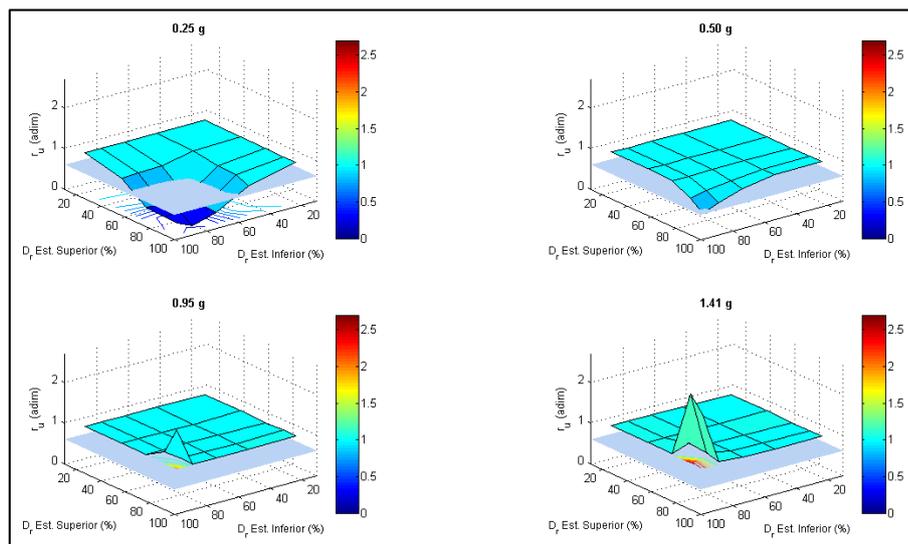


Figura 77. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 2 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.3. Escenario 3.

El escenario 3 tiene 15 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna desde la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2. En este escenario existieron modelos donde la simulación falla en su convergencia, por lo tanto, dichos resultados no se exponen en las gráficas que se muestran a continuación, y corresponden a los modelos con intensidades de

sismo de 1.41 g que tienen densidad relativa de 20% en el estrato inferior, para todas las combinaciones de densidad relativa del estrato superior.

#### 4.3.3.1. Gráficas de desplazamiento.

Según la Figura 78 los desplazamientos para el escenario 3, de acuerdo a los modelos que convergen, se mantienen menores a 50 cm, sin embargo cuando el estrato inferior tiene densidad relativa menor a 50% los desplazamientos, incluso para cargas de sismo pequeñas, son elevados, como se nota en el caso de la intensidad de sismo de 0.95 g y densidad relativa muy suelta en el estrato inferior, que tiene valores de desplazamiento similares a cuando la intensidad de sismo es 1.41 g y la densidad relativa es suelta.

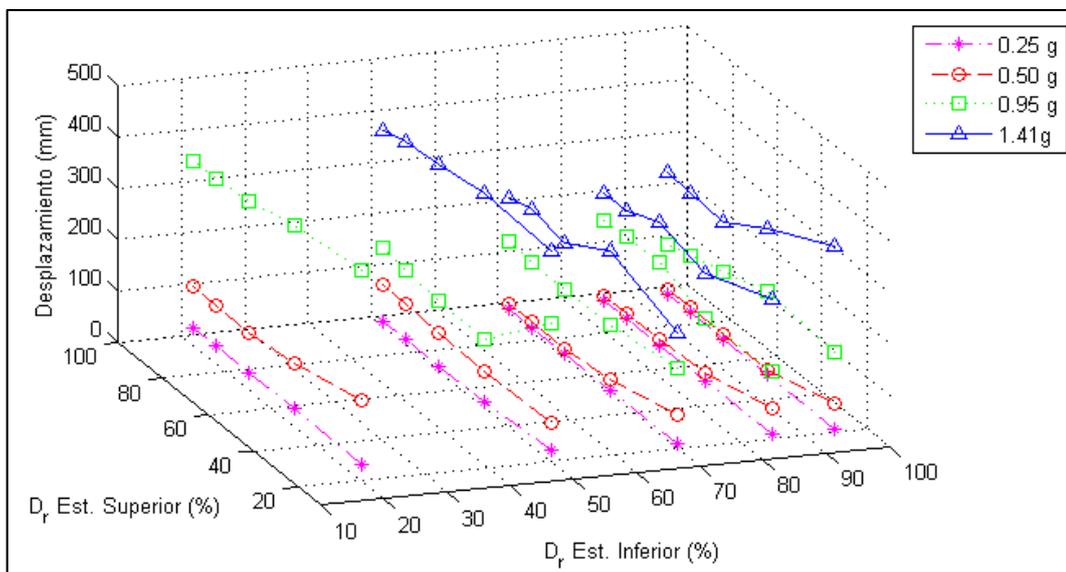


Figura 78. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 3, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

Con los valores de desplazamientos obtenidos para el escenario 3, se puede observar que los desplazamientos horizontales más altos representan menos del 3% de la altura de la columna de suelo, los modelos de intensidad de sismo menores a 0.50 g se mantienen menores al 1% de los 15 m de altura como se muestra en la Figura 79.

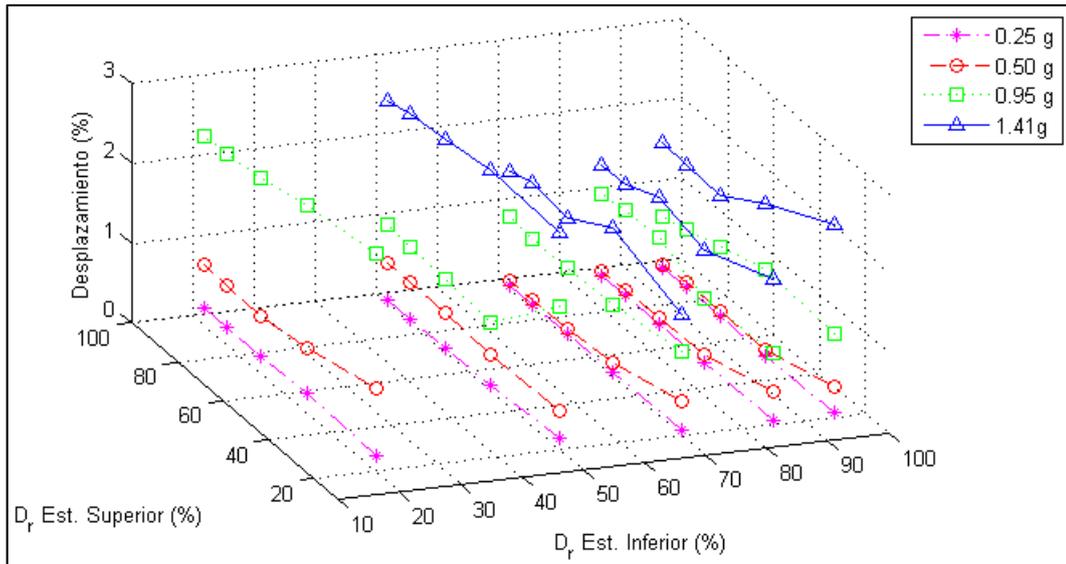


Figura 79. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 3, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.3.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Se observa en la Figura 80, para los casos que convergen, cuando se tiene densidad relativa de 20% en el estrato inferior, la carga sísmica no es significativa: los modelos con todas las intensidades de sismo y dicha densidad presentan licuefacción en la columna de suelo. Cuando la intensidad de sismo aumenta a 0.50 g, los modelos que presentan combinaciones de arena muy suelta y suelta en el estrato inferior, llegan a licuar, mientras que los más densos no. Para las intensidades de sismo más altas, en los modelos que convergen, todos activaron la licuefacción, independientemente de la combinación de densidad relativa que tengan en sus estratos.

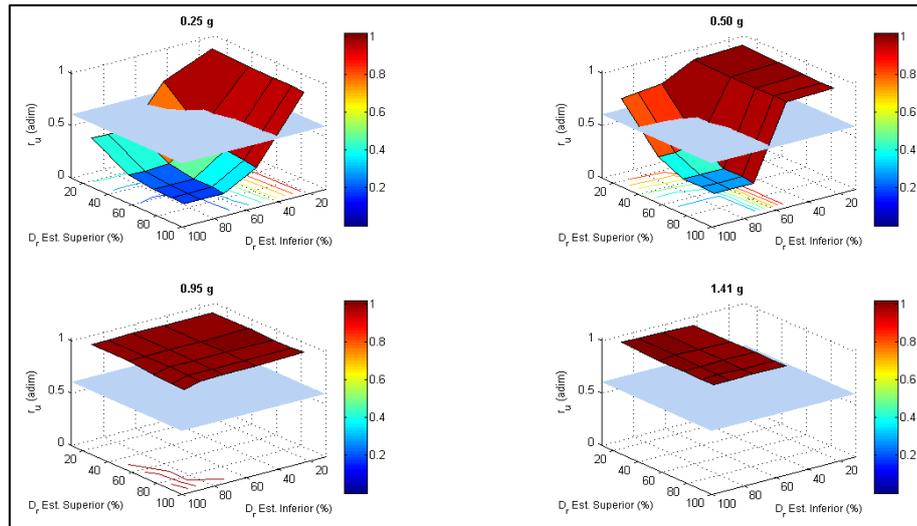


Figura 80. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 3 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.4. Escenario 4.

El escenario 4, tiene de altura de la columna de suelo 15 m y 2 m de ancho, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático a 1/2 de la altura de la columna y estratificación Uniforme Tipo 2. En este escenario, al igual que el anterior, algunos modelos presentaron errores de convergencia, y son los modelos de intensidades de sismo de 0.95 g y 1.41 g que tienen densidad relativa de 20% en el estrato inferior, para todas las combinaciones de densidad relativa del estrato superior.

##### 4.3.4.1. Gráficas de desplazamiento.

Se puede observar en la Figura 81 los desplazamientos máximos obtenidos para el escenario 4, los cuales en su mayoría para los modelos que pudieron converger, son menores a 25 cm. Para la intensidad de sismo de 1.41 g se presentan los mayores valores, los cuales corresponden a los modelos que presentaron licuefacción. Los valores de desplazamiento para el resto de intensidades de sismo, se mantienen menores a 10 cm, a excepción del caso donde la intensidad es de 0.95 g y la densidad relativa del estrato inferior es de 50%, donde alcanza desplazamientos de hasta 19 cm aproximadamente. Se observa que densidades más sueltas en los estratos inferiores pueden generar desplazamientos altos.

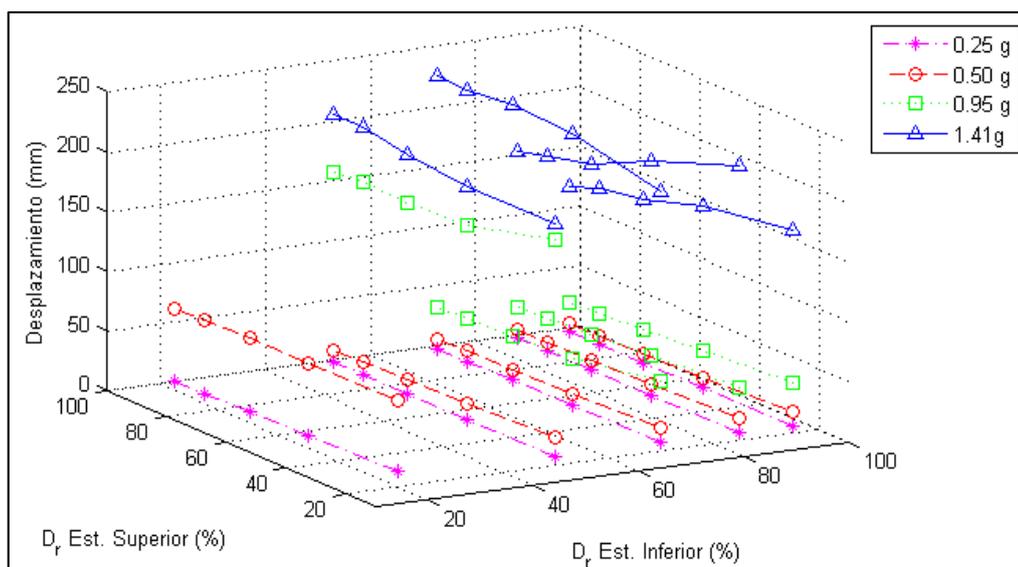


Figura 81. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 4, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a ½ de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

Los desplazamientos obtenidos para este escenario son relativamente bajos, respecto a la altura de la columna de suelo, como se visualiza en la Figura 82 donde los máximos desplazamientos se mantienen en 2% de la altura de la columna de suelo.

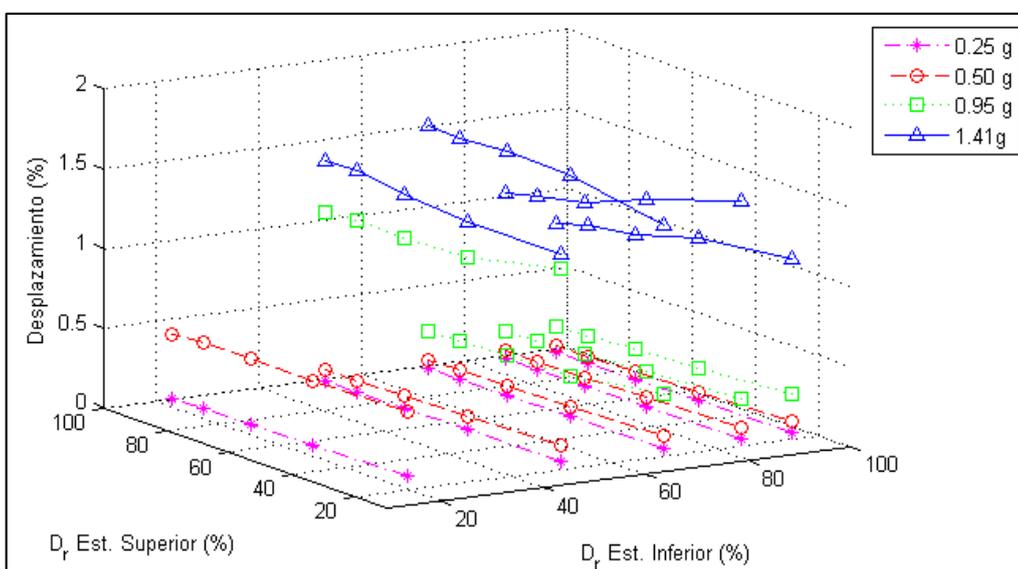


Figura 82. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 4, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a ½ de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

**4.3.4.2. Gráficas de la relación de presión de poros.**

Para este escenario, en el caso de la intensidad de sismo de 0.25 g, un único modelo logra alcanzar el límite de licuefacción de 0.6 en la relación de presión de poros, en el caso de la

intensidad de sismo de 0.50 g, los modelos que tienen en el estrato inferior una arena muy suelta llegan a licuar, en el caso de 0.95 g, al igual que en la intensidad de sismo anterior, licuan los modelos que tienen en el estrato inferior arena suelta y muy suelta, y en la mayor intensidad de sismo de 1.41 g los modelos que convergen; aquellos de densidad relativa en el estrato inferior de 50% en adelante, presentan licuefacción, lo cual se puede observar en la Figura 83. Se puede observar además que para este escenario, donde la profundidad del nivel freático es de la mitad de la altura de la columna de suelo, en intensidades de sismo pequeñas, la licuefacción del suelo muy probablemente no se presente, pero conforme se aumente la intensidad del sismo en la columna de suelo, no solo las arenas más sueltas, sino también las densas presenten el fenómeno de licuefacción.

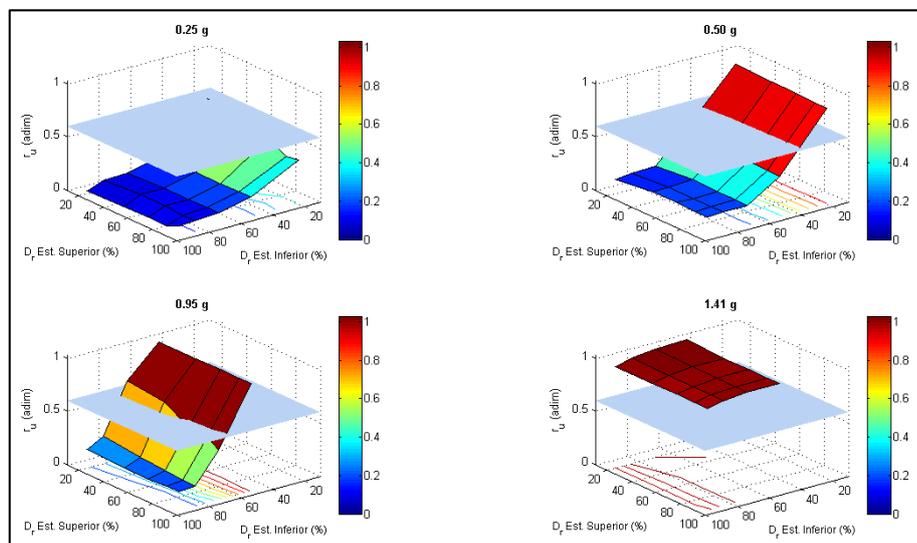


Figura 83. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 4 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.5. Escenario 5.

El escenario 5, tiene 15 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático nulo (H) que deja en estado seco a la columna de suelo y estratificación Uniforme Tipo 2.

##### 4.3.5.1. Gráficas de desplazamiento.

Los desplazamientos máximos en este escenario son menores a 1.5 m como se puede comprobar en la Figura 84, incluso los valores correspondientes a los modelos del escenario, tienen una tendencia uniforme, independientemente de la intensidad de aceleración sísmica, mayores desplazamientos se tienen cuando los estratos que componen la columna de suelo son muy sueltos y desplazamientos muy pequeños de aproximadamente 25 cm cuando los estratos son muy densos.

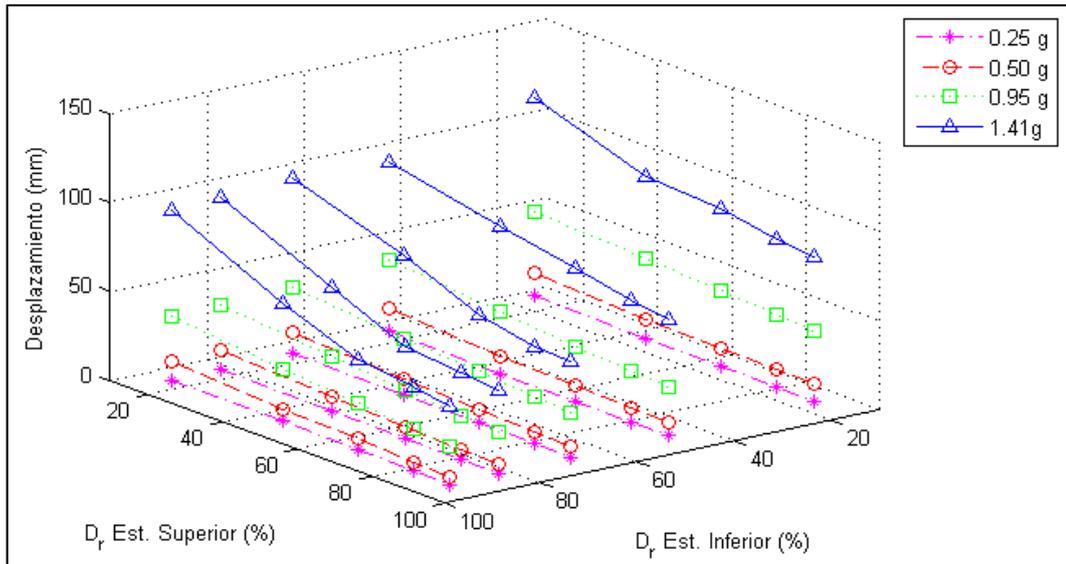


Figura 84. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 5, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático de la altura de la columna o en estado seco.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

Así mismo, los valores de los desplazamientos de la figura anterior respecto a los 15 m de la altura de la columna de suelo representan menos del 1%, como se observa en la Figura 85.

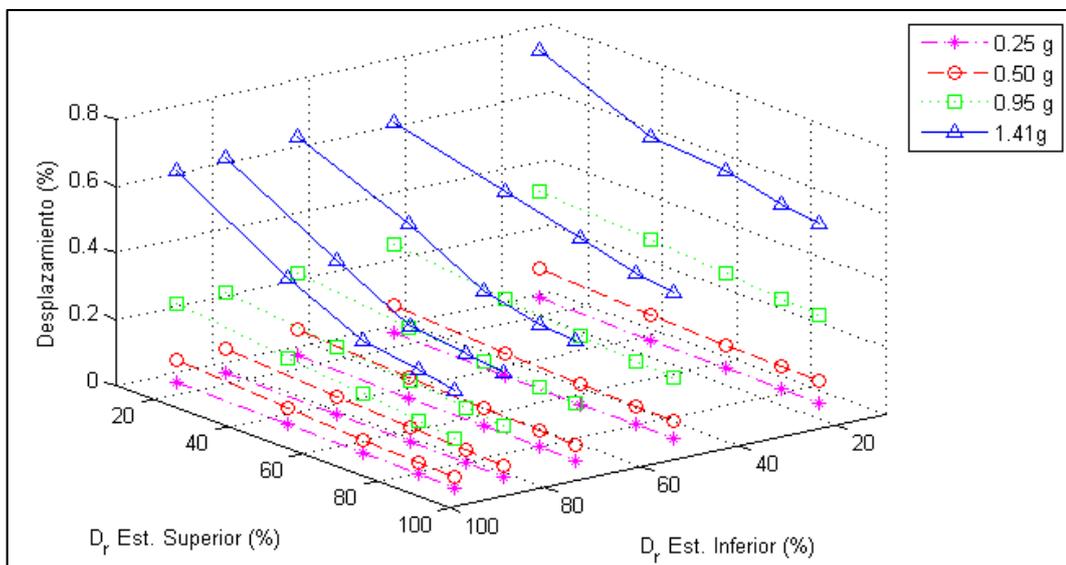


Figura 85. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 5, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático de la altura de la columna o en estado seco.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.5.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Para este escenario, que tiene un nivel freático en el fondo de la columna de suelo, se espera que ningún modelo active la licuefacción de suelos según la base teórica, lo cual se ha logrado confirmar con los resultados de las modelaciones que se muestran en la Figura 86, que sin

importar la densidad de los estratos del suelo, o la intensidad del sismo, cuando no existe presencia de agua en el suelo, ningún modelo presenta licuefacción.

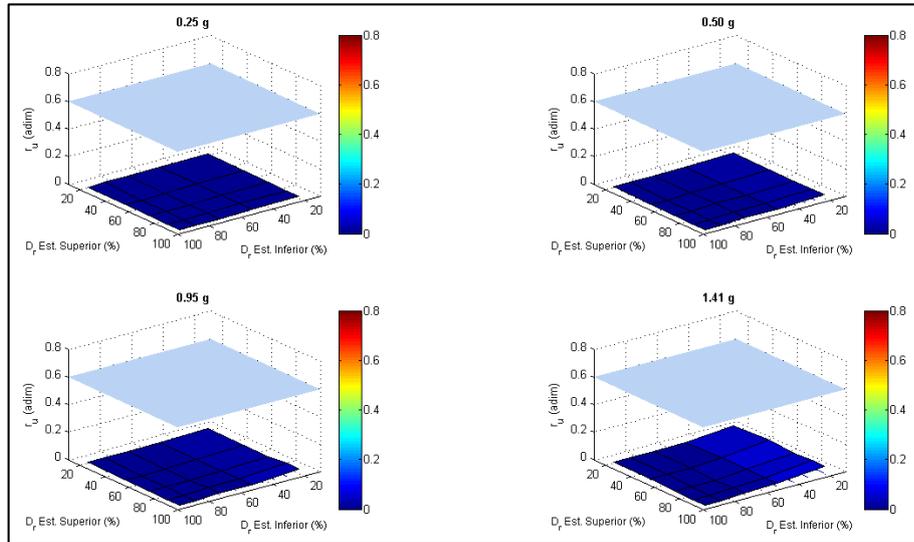


Figura 86. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 5, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.6. Escenario 6.

El escenario 6, tiene de altura 15 m y 2 m de ancho de la columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos Creciente.

##### 4.3.6.1. Gráficas de desplazamiento.

En la Figura 87 se observa que existen desplazamientos considerables en las combinaciones de estratos muy sueltos para la columna de suelo, los cuales están entre 2.50 m a 6 m aproximadamente para la intensidad más alta de sismo, a partir de las combinaciones de estratos con densidades sueltas, los desplazamientos para demás intensidades de sismo son menores a 2 m.

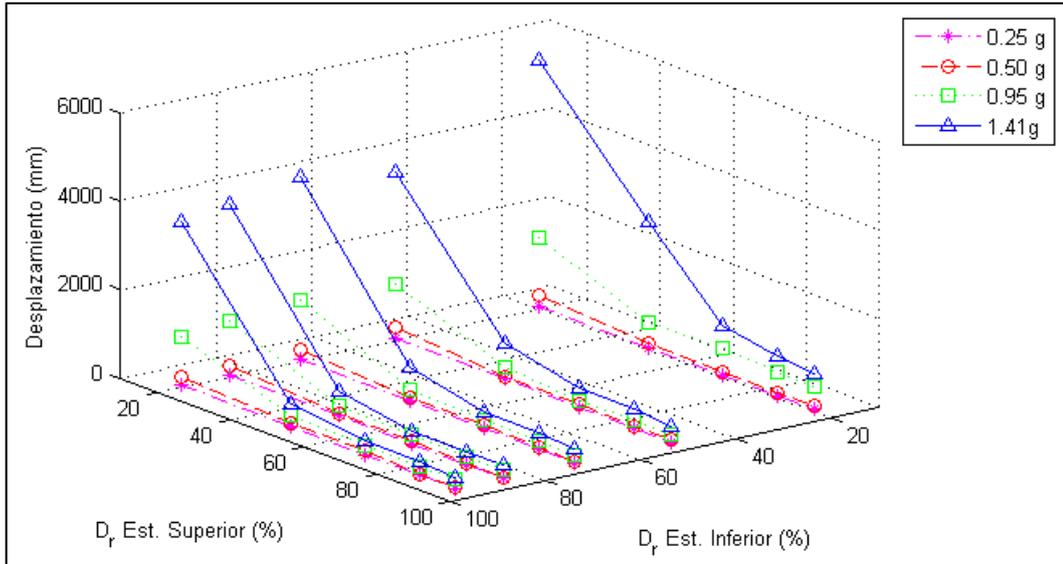


Figura 87. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 6, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

El máximo desplazamiento obtenido para este escenario 6, corresponde al modelo que tiene densidades relativas muy sueltas en sus estratos, y representa aproximadamente un 38% de la altura de la columna de suelo. Los demás desplazamientos para las intensidades de sismo menores a 0.95 g se mantienen menores al 20% de la altura de la columna de suelo, como se muestra en la Figura 88. Estos porcentajes son considerables, en relación a la altura total de la columna de suelo.

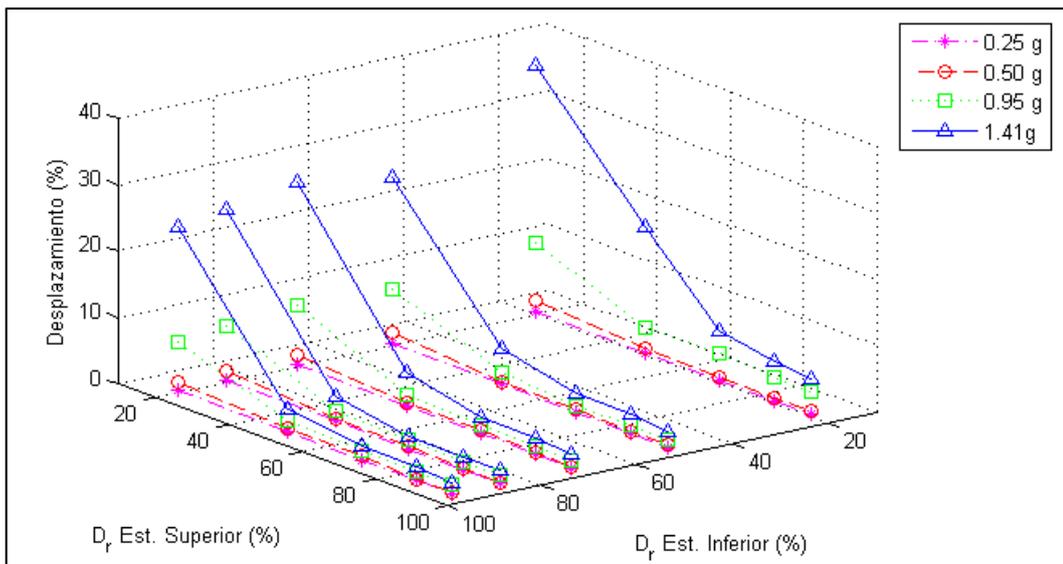


Figura 88. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 6, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.6.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

En la Figura 89 se observa que todos los modelos con intensidades de sismo 0.95 g y 1.41 g, en todas las combinaciones de densidad relativa de sus estratos, presentan el fenómeno de licuefacción, incluso para los modelos que tienen estratos más densos, la presión de poros excede a la presión de confinamiento inicial del suelo en más de 1.5 veces. Para las intensidades de sismo de 0.25 g y 0.5 g los modelos que llegan a la licuefacción del suelo son los que tienen combinaciones de densidad relativa menores a 50% y 85% respectivamente.

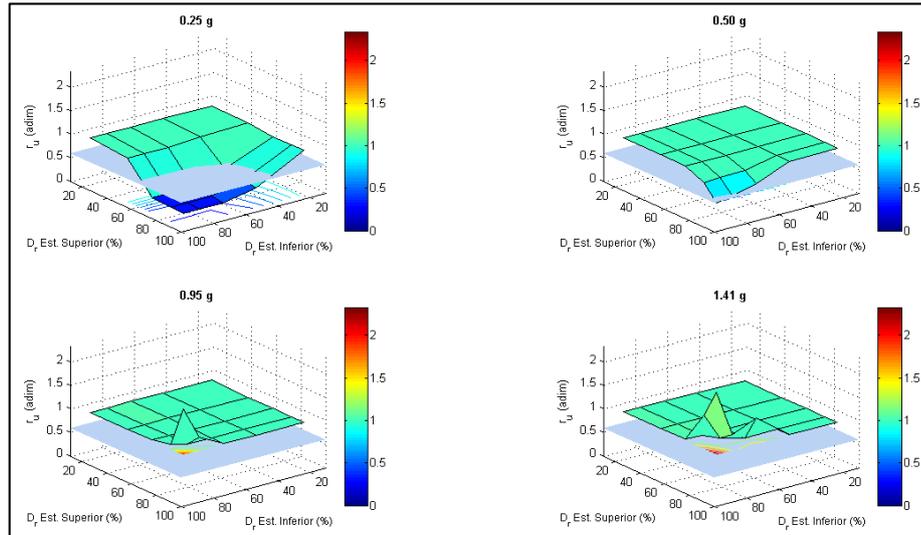


Figura 89. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 6, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.7. Escenario 7.

El escenario 7, tiene 15 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna desde la superficie del terreno, y asociación de estratos Creciente.

##### 4.3.7.1. Gráficas de desplazamiento.

Los desplazamientos máximos para este escenario se mantienen menores a 1 m. Cuando el estrato inferior tiene 20% de densidad relativa, los desplazamientos son los mayores en este escenario. En el caso de la intensidad de sismo de 1.41 g, los desplazamientos registrados tienen una variación observable en la Figura 90, sin embargo para las demás intensidades se puede observar que mantienen una tendencia de mayores desplazamientos cuando el estrato superior de la columna de suelo es muy suelta y menores desplazamientos conforme se densifican los estratos, con valores menores a los 40 cm.

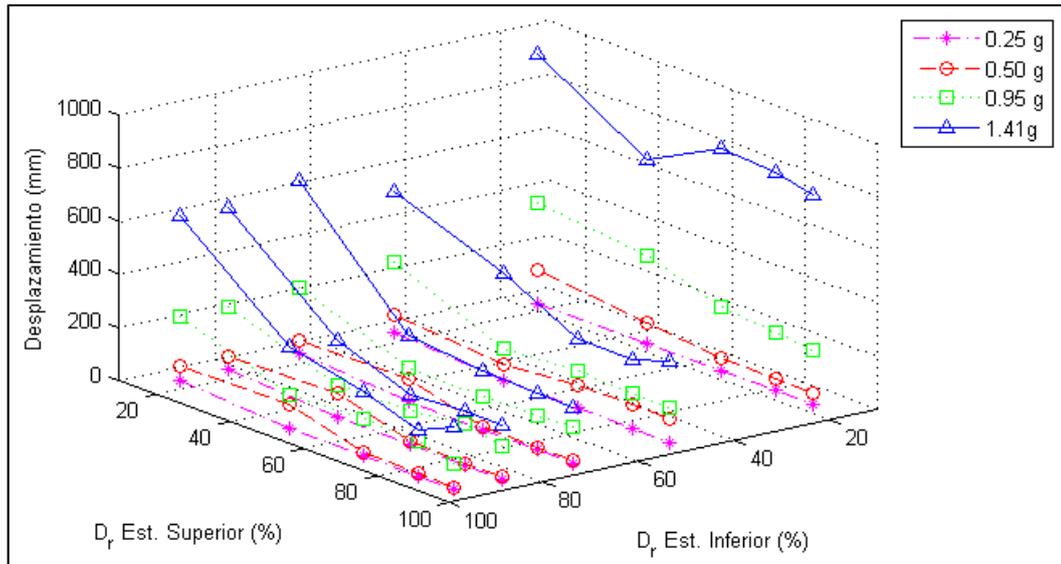


Figura 90. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 7, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Los porcentajes de los desplazamientos máximos para el escenario 7, se conservan menores al 6 % de la altura de la columna de suelo, como se visualiza en la Figura 91.

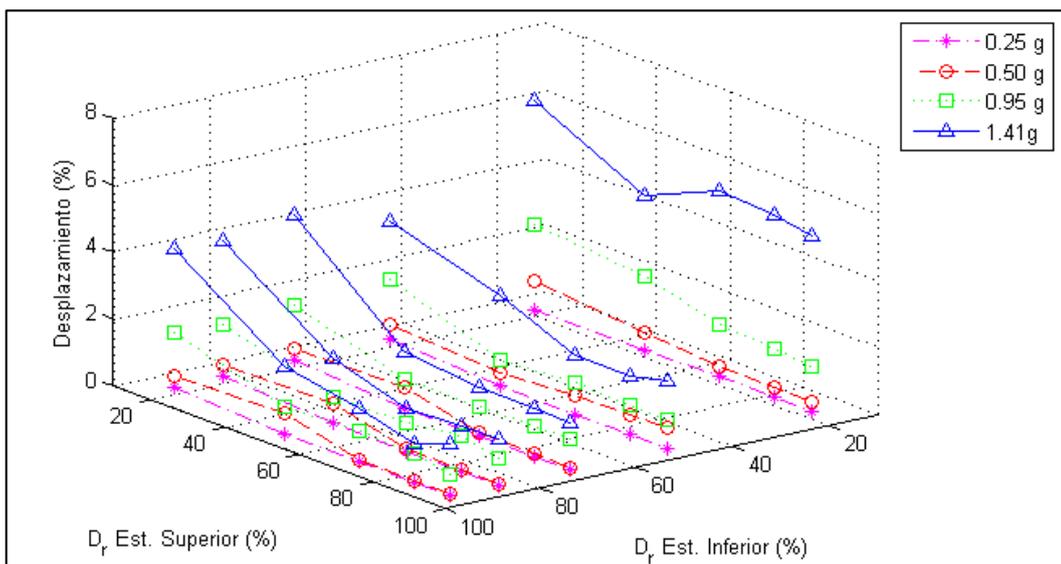


Figura 91. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 7, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.7.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

De acuerdo a la Figura 92, se tiene que los modelos con combinaciones de arena muy suelta independientemente de la intensidad de sismo, presentan licuefacción. Los modelos con todas las combinaciones de densidad relativa en sus estratos, para las intensidades de sismo de 0.95 g y 1.41 g presentan el fenómeno de licuefacción. Respecto a las intensidades de sismo

restantes, los modelos que llegan a licuar son los que tienen combinaciones de densidad relativa muy sueltas para 0.25 g y para 0.50 g las combinaciones de arena suelta.

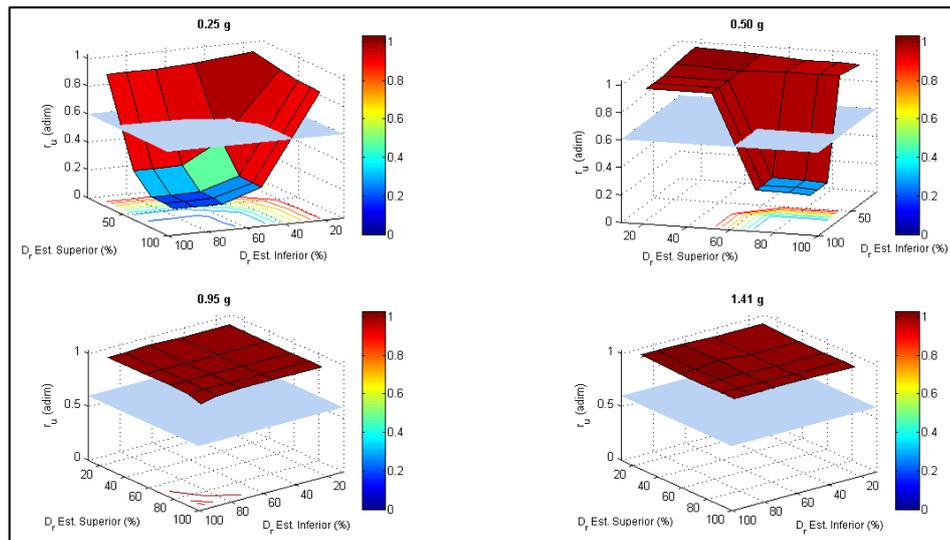


Figura 92. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 7, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.8. Escenario 8.

El escenario 8, tiene de altura de la columna de suelo 15 m y de ancho 2 m, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático en a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna desde la superficie del terreno, y asociación de estratos Creciente. En este escenario se tiene ciertas modelaciones que no llegaron a converger donde se incluye: todos los modelos con intensidades de sismo de 0.95 g y densidad relativa de 20% en el estrato inferior; los modelos con intensidad de 1.41 g y combinaciones de estrato inferior de densidad relativa de 20 % y estratos superiores de 85 % y 95%.

##### 4.3.8.1. Gráficas de desplazamiento.

En este escenario, los desplazamientos máximos obtenidos para los modelos que llegaron a converger, son menores a 25 cm. Al igual que en el escenario 4, donde se tiene la misma altura de columna de suelo y misma ubicación del nivel freático, cuando se tienen una intensidad de sismo de 1.41 g se obtuvieron los mayores valores, que corresponden a los modelos que presentaron licuefacción (Figura 95). Los valores de desplazamiento para el resto de intensidades de sismo, se mantienen menores a 17 cm como se observa en la Figura 93.

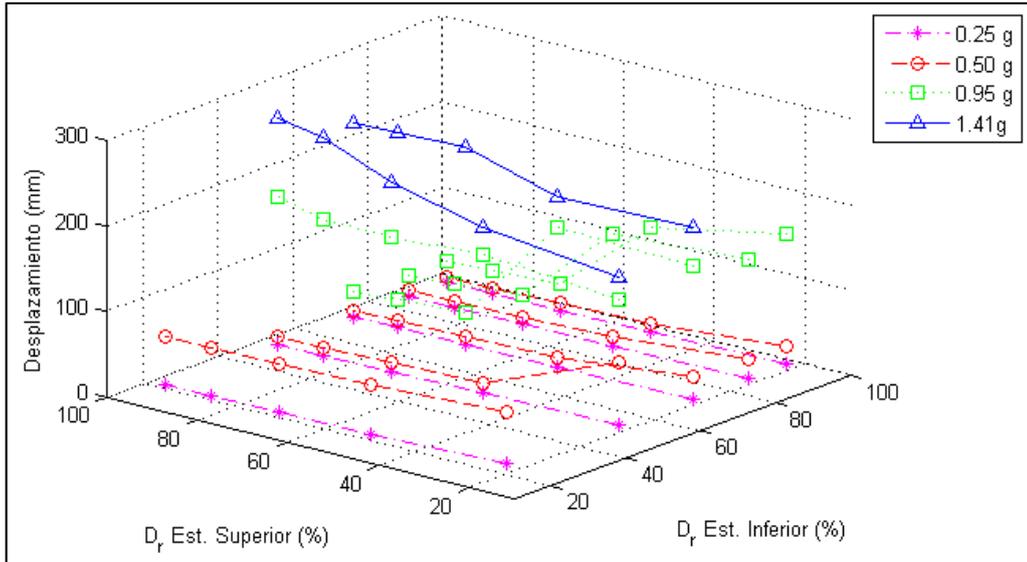


Figura 93. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 8, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

En la Figura 94 se observa los desplazamientos del escenario 8, como porcentaje de la altura de la columna de suelo, los cuales son menores a 2 %, al igual que los desplazamientos obtenidos para el escenario 4.

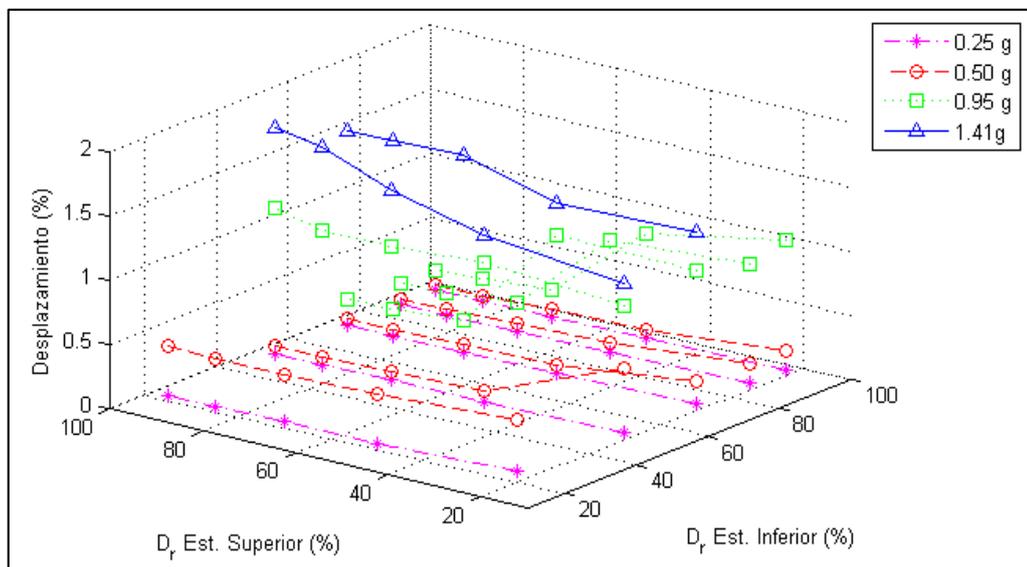


Figura 94. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 8, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.8.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

En la Figura 95 se puede ver que cuando se tiene una intensidad de sismo de 0.25 g, un solo modelo logra alcanzar el límite de licuefacción del suelo a 0.6 de la relación de presión de

poros; de manera muy similar a lo ocurrido en el Escenario 4, para la misma intensidad de sismo (0.50 g), los modelos que en uno de sus estratos o ambos tienen densidad relativa muy suelta son los que llegan a licuar; en el caso de 0.95 g, de los modelos que convergen, se activa la licuefacción en aquellos que tienen alguna combinación de estratos con arena suelta o muy suelta; y finalmente cuando se tiene intensidad de sismo de 1.41 g, de los modelos que convergen todos presentan licuefacción. Como se pudo notar en el Escenario 4, con el nivel freático ubicado de igual forma en la mitad de la columna de suelo, para intensidades de sismo pequeñas de 0.25 g, la licuefacción del suelo muy probablemente no se presente, pero conforme se aumente la intensidad del sismo, los modelos con combinaciones en sus estratos que contengan arena suelta, si lleguen a licuar, e incluso si la carga de sismo es de grandes magnitudes, los suelos más densos también presenten el fenómeno de licuefacción.

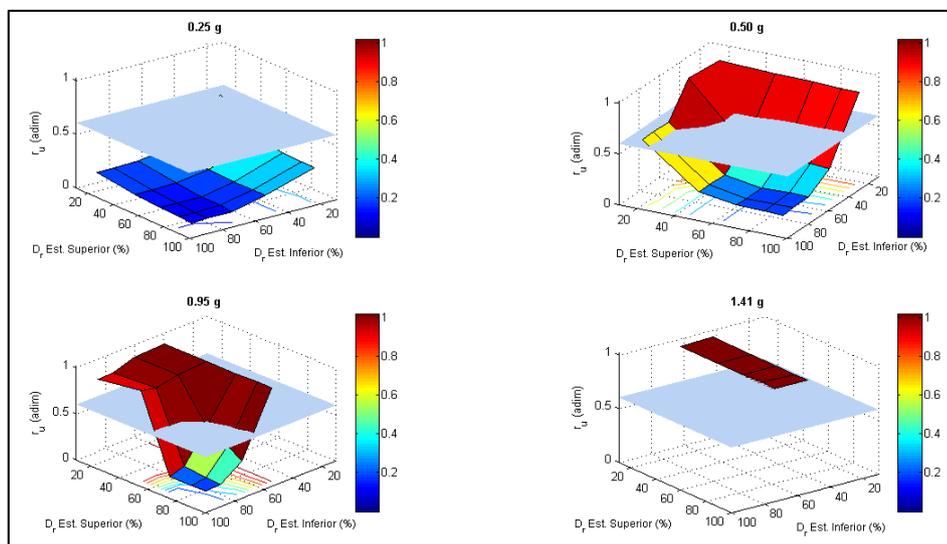


Figura 95. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 8 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.9. Escenario 9.

El escenario 9, tiene 15 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, 0 % de pendiente, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos Decreciente.

##### 4.3.9.1. Gráficas de desplazamiento.

Debido a la estratificación del suelo, cuando se tiene el estrato inferior con densidad relativa de 20 %, que representa  $\frac{3}{4}$  de la altura de la columna de suelo, los desplazamientos que se obtienen son bastante altos, especialmente para la intensidad de sismo de 1.41 g, como se puede ver en la Figura 96, donde los desplazamientos para esta condición llegan a los 5,6 m aproximadamente. Para los demás modelos los desplazamientos máximos obtenidos son menores a los 2 m.

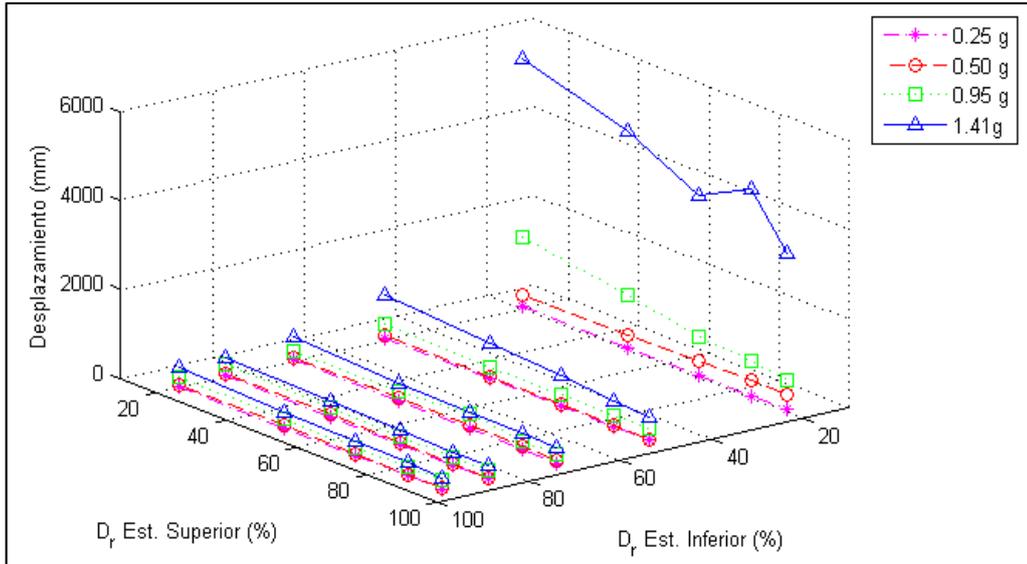


Figura 96. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 9, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.  
 Fuente: Los Autores.  
 Elaboración: Los Autores.

Los porcentajes de desplazamientos máximos respecto a la altura de la columna de suelo, para los modelos que tienen en el estrato inferior arena muy suelta, y con la más alta intensidad de sismo, llegan a representar casi el 37 % de la altura, para los demás modelos, los porcentajes del desplazamiento son menores al 10 % de la altura, como se visualiza en la Figura 97.

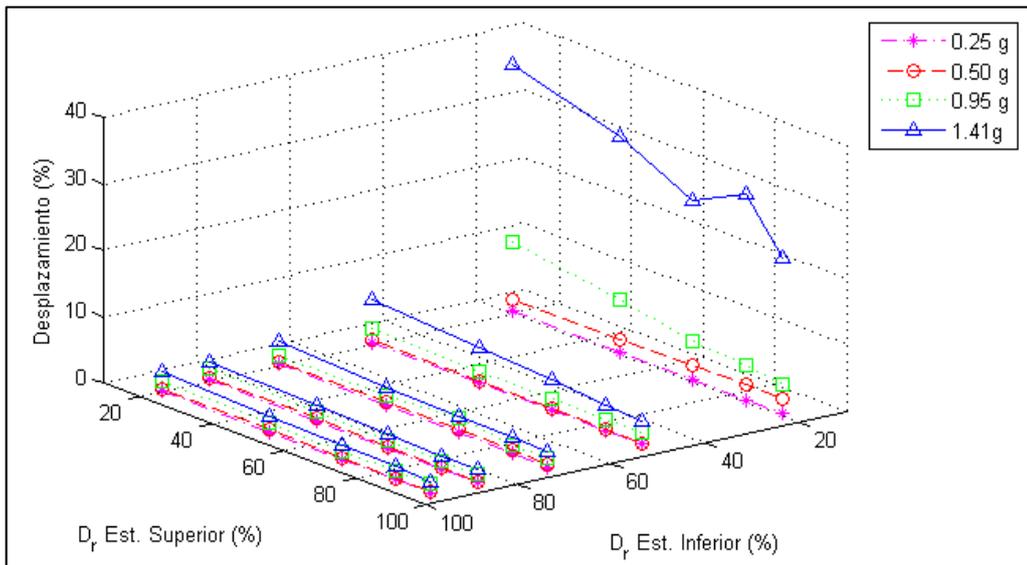


Figura 97. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 9, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.  
 Fuente: Los Autores.  
 Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.9.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

En la Figura 98 se puede observar que los modelos con combinaciones de arena menores a 50% independientemente de la intensidad de sismo, presentan licuefacción. Adicionalmente, para la intensidad de sismo de 0.25 g los modelos que tienen los estratos inferiores de moderados a muy densos y los estratos superiores muy sueltos llegan a licuar. Ocurre una excepción en la intensidad de 0.50 g donde los modelos con combinaciones de estratos con arenas muy densas que no licuan, a partir esa intensidad de sismo, sin incluir ese caso particular, todos los modelos presentan licuefacción.

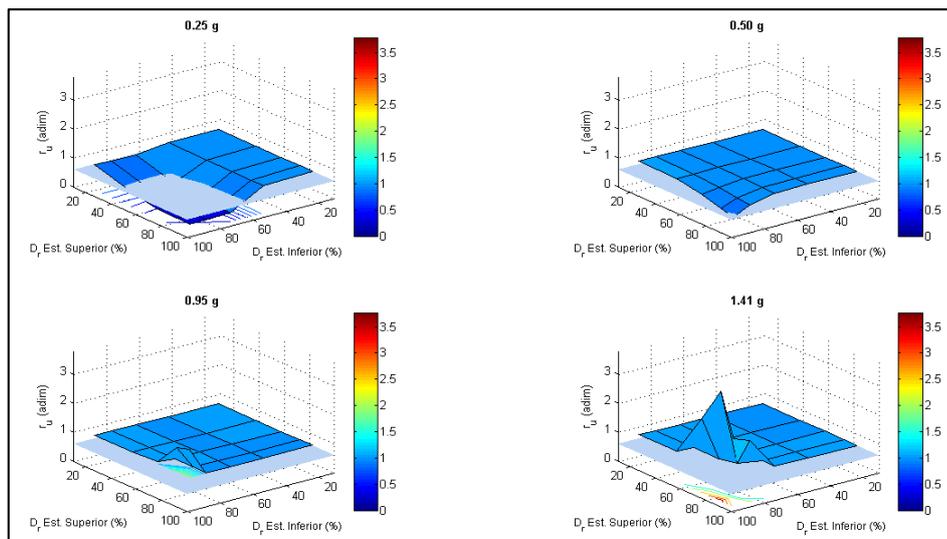


Figura 98. Relación de presión de poro máximas obtenidas para el escenario 9, en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.10. Escenario 10.

El escenario 10, tiene 30 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, 0 % de pendiente, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2.

##### 4.3.10.1. Gráficas de desplazamiento.

Este escenario, presenta las mismas condiciones que el escenario 2, con excepción de la altura de la columna, en este caso de 30 m. Los desplazamientos de mayor magnitud se presentan cuando en el estrato inferior como superior se tiene valores de densidades relativas menores a 50 %. A partir de las intensidades de sismo de 0.95 g en adelante, en el caso de tener el estrato superior muy suelto se tiene desplazamientos mayores a 2 m, como se observa en la Figura 99.

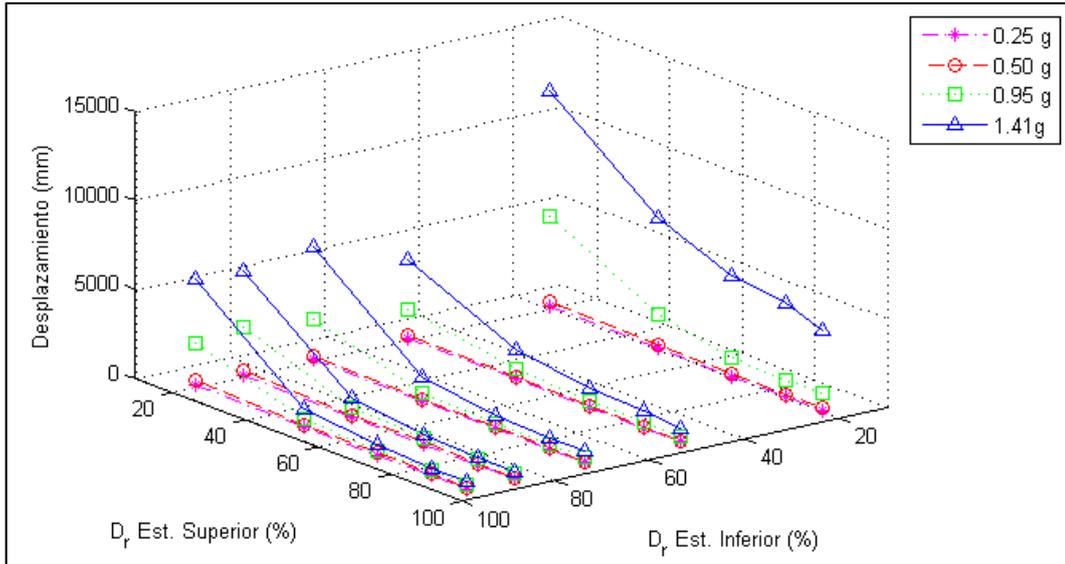


Figura 99. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 10, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

Los porcentajes de los desplazamientos máximos para el escenario 10, se presentan menores al 40% de la altura de la columna de suelo (Figura 100).

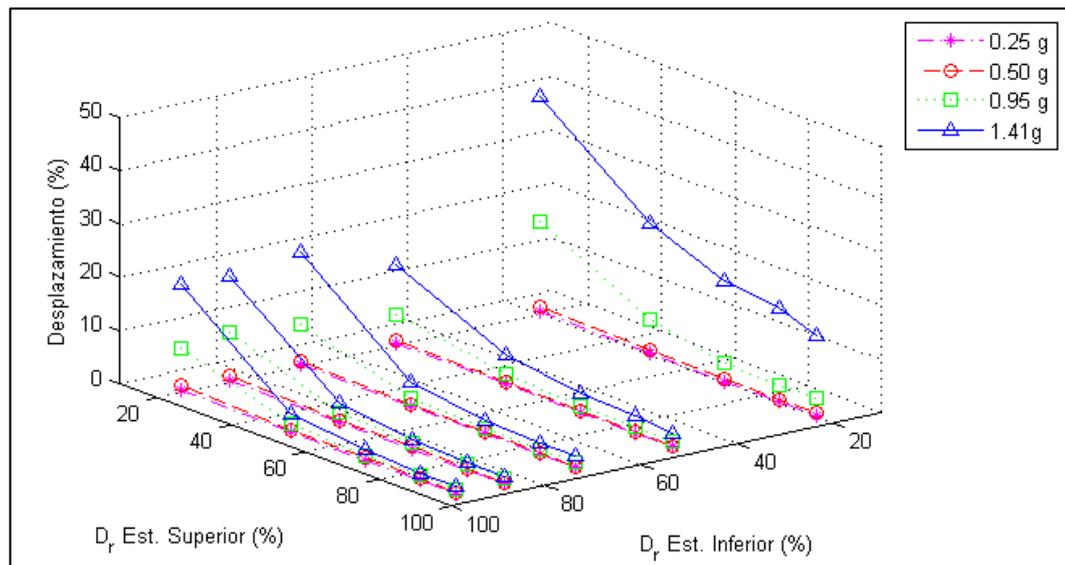


Figura 100. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 10, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.10.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Para este escenario se observa en la Figura 101 que los modelos con cualquier combinación de densidad relativa en sus estratos, a partir de la intensidad de sismo de 0.50 g en su totalidad presentan licuefacción. En la intensidad de 0.25 g las combinaciones de estratos con arenas de moderadas a muy densas, no llegan a activar la licuefacción. El comportamiento que

presenta este escenario respecto a la relación de presión de poros en su mayoría es similar al del escenario 2.

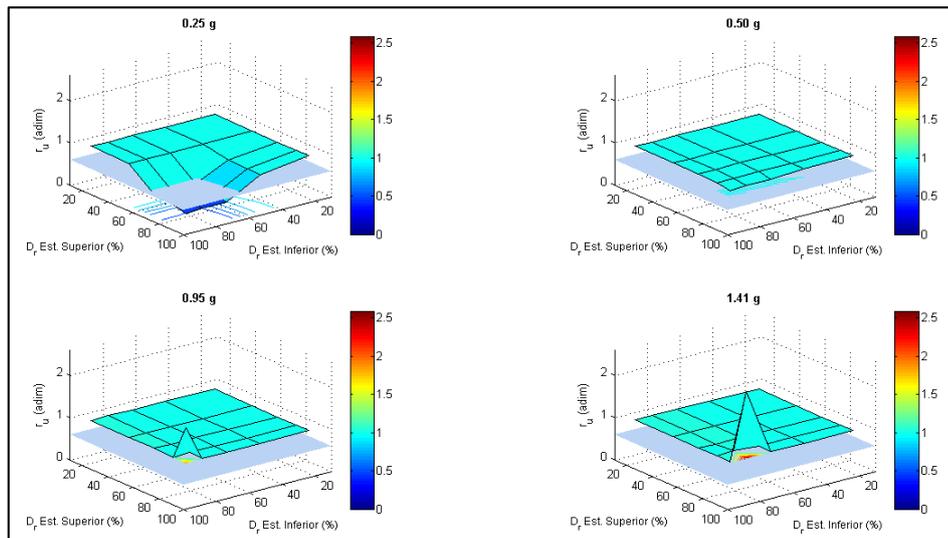


Figura 101. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 10 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.11. Escenario 11

El escenario 11, tiene 30 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, pendiente de 0%, ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna, desde la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2. Este escenario tiene modelos que no convergen, y son los que tienen intensidad de sismo de 0.95 g con densidad relativa de 20 % en el estrato inferior y los modelos que tienen 1.41 g con 95 % de densidad relativa en el estrato inferior.

##### 4.3.11.1. Gráficas de desplazamiento.

De los valores de desplazamientos para los modelos que convergen en este escenario, como se observa en la Figura 102, tienden a ser mayores cuando la carga sísmica es alta y la densidad relativa del estrato inferior es muy suelta, cuando en el estrato superior la densidad relativa adquiere menor valor, se obtienen desplazamientos altos. Los modelos restantes que tienen en el estrato inferior de la columna de suelo densidades mayores a 50 % son menores a un metro con cualquier carga sísmica. Este escenario tiene las mismas condiciones de nivel freático y estratificación que el escenario 3, con la diferencia de tener el doble de la altura. Los desplazamientos obtenidos para este escenario, respecto a los del escenario 3, son altos puesto que, en dicho escenario las magnitudes se mantienen menores a 50 cm, en este caso se incrementan hasta 5 veces.

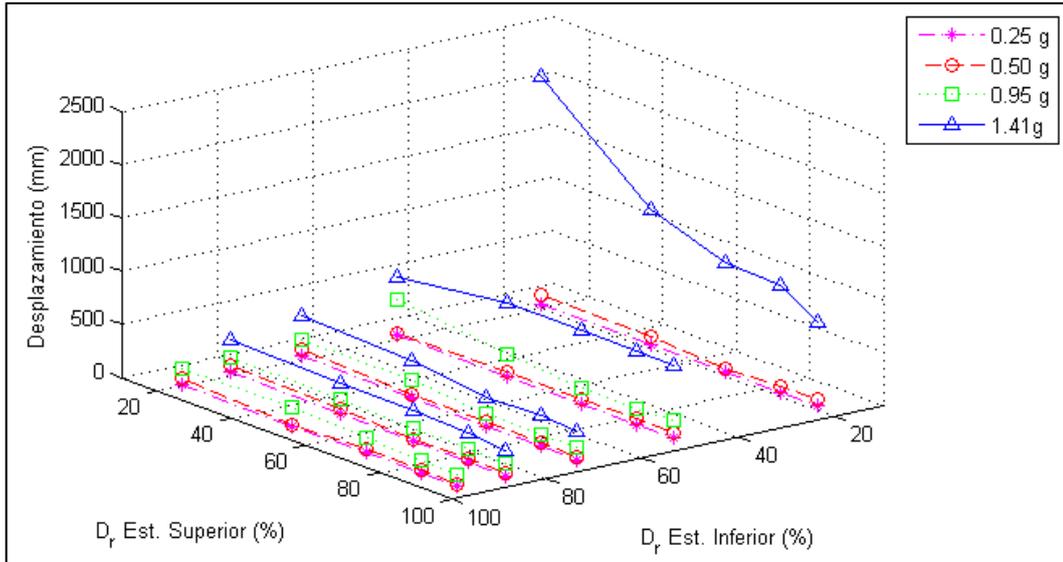


Figura 102. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 11, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Al comparar con el escenario 3, donde los desplazamientos representan menos del 3 %, en este escenario de acuerdo a la Figura 103, se tiene que el desplazamiento máximo, para el caso donde la combinación de arena en los estratos es muy suelta, llega a 7.3 % aproximadamente, esto representa más del doble de lo obtenido para el escenario 3; estos valores disminuyen en porcentaje conforme el estrato superior aumenta la densidad relativa. Para las demás intensidades de sismo, los modelos se mantienen menores al 3 % de la altura de la columna de suelo.

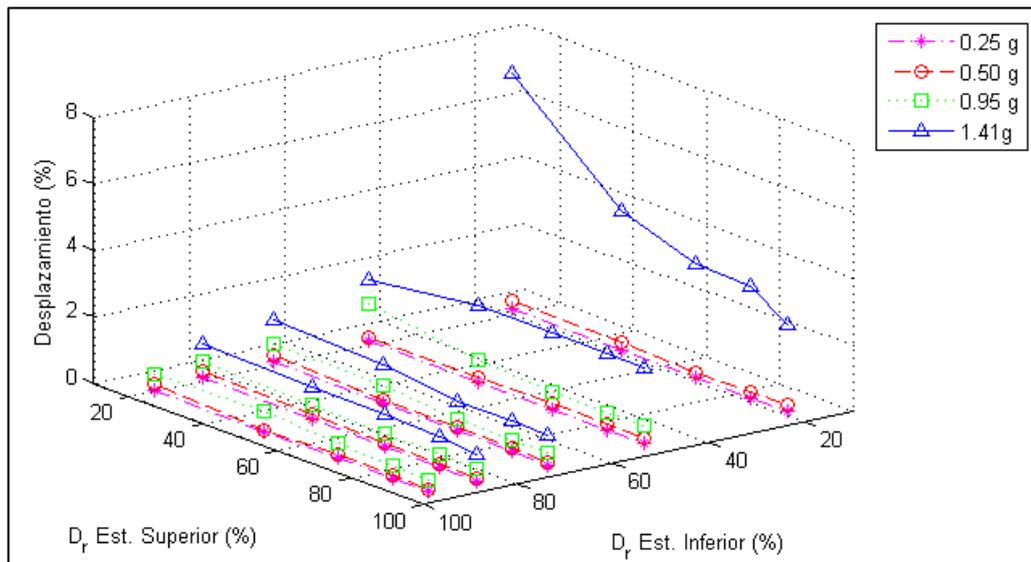


Figura 103. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 11, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{4}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.11.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

De acuerdo a la Figura 104, para cualquier carga sísmica se evidencia que de los modelos que convergen, los que tienen densidades relativas de 20 % y 50 % en el estrato inferior y cualquier combinación de densidad relativa en el estrato superior presentan el fenómeno de licuefacción. Para las intensidades de sismo de 0.25 g y 0.50 g cuando tienen densidades relativas mayores a 70 % en el estrato inferior, ya no presentan la licuefacción del suelo, sin embargo, para las intensidades de 0.95 g y 1.41 g, todos los modelos que convergen, al igual que en el escenario 3, llegaron a licuar.

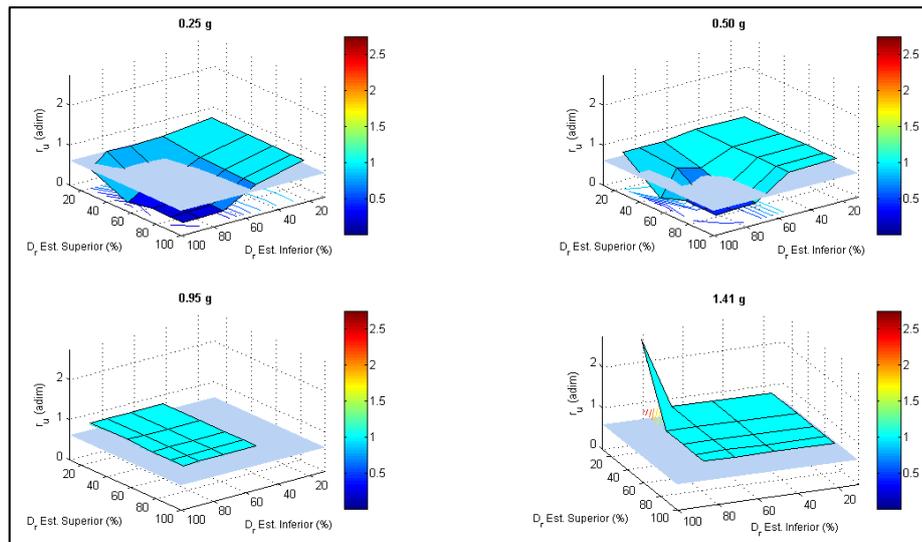


Figura 104. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 11 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.12. Escenario 12.

El escenario 12, tiene 30 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, 0% de pendiente, ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna desde la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2. En este escenario no convergen los modelos que tienen densidad relativa de 20 % en el estrato inferior para las intensidades de sismo de 0.95 g y 1.41 g, los cuales no se han considerado en las gráficas siguientes.

##### 4.3.12.1. Gráficas de desplazamiento.

El escenario 12, a diferencia de la altura de la columna de suelo presenta las mismas condiciones de nivel freático y estratificación del suelo que el escenario 4, donde los valores obtenidos de desplazamiento se mantienen menores a 25 cm, en este escenario, se mantienen menores a 30 cm. Considerando que el escenario 12 tiene el doble de la altura del escenario 4, los desplazamientos obtenidos son bajos, como se muestra en la Figura 105, que

tienen una tendencia de disminuir conforme la densidad relativa es más densa y la intensidad de sismo es más baja.

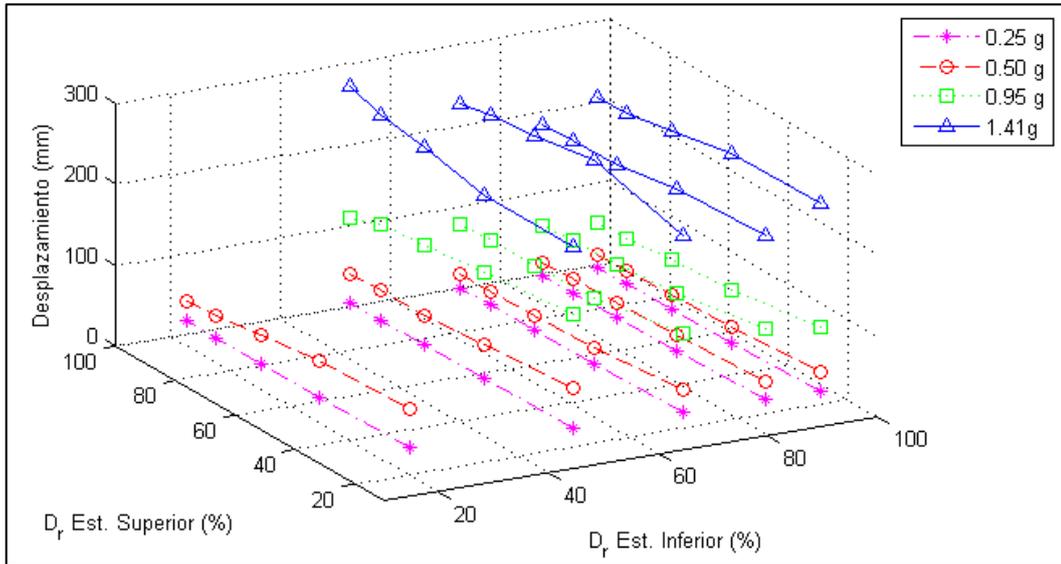


Figura 105. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 12, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

Como se ha mencionado, los desplazamientos horizontales de este escenario son bajos, pues representan cerca del 1 % de la altura de la columna de suelo (Figura 106).

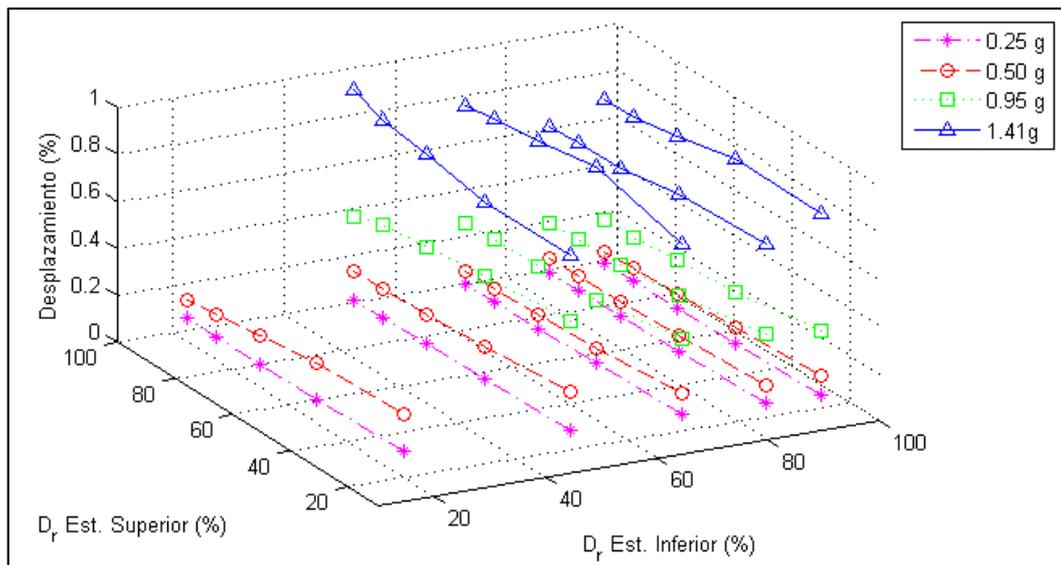


Figura 106. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 12, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.  
Fuente: Los Autores.  
Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.12.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Para este escenario donde el nivel freático se ubica a la mitad de la columna del suelo, los modelos que presentan licuefacción de suelos son los que tienen densidad relativa en el estrato inferior de 20 % para la intensidad de sismo de 0.25 g; cuando la intensidad de sismo es de 0.50 g, adicional a los modelos de 0.25 g, licúan también los que tienen densidad relativa en el estrato inferior de 50 %; para 0.95 g, de los modelos que convergen son los que tienen densidad relativa en el estrato inferior menor a 70 %, finalmente para la intensidad de 1.41 g todos los modelos licúan, como se observa en la Figura 107.

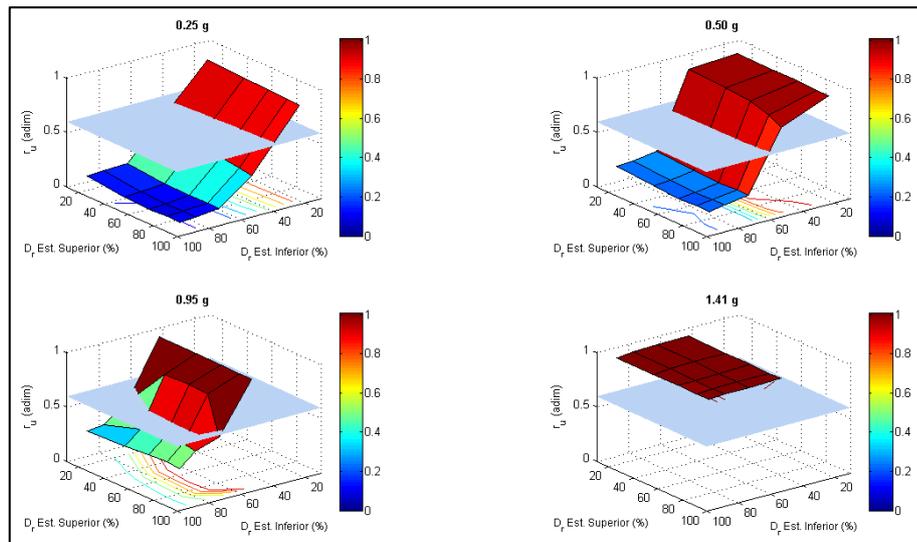


Figura 107. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 12 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.13. Escenario 13.

El escenario 13, tiene 60 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, 0 % de pendiente, ubicación del nivel freático en la superficie del terreno y asociación de estratos Uniforme Tipo 2.

##### 4.3.13.1. Gráficas de desplazamiento.

Los desplazamientos máximos para este escenario donde la altura de la columna de suelo es de 60 m, llegan a casi 20 m para el modelo con combinación de estratos más sueltos y 1.41 g de intensidad de sismo. Con la intensidad de sismo menor a 0.50 g los desplazamientos para todos los modelos correspondientes se mantienen menores a 5 m, incluso en las combinaciones de estratos más sueltos como se observa en la Figura 108. Este escenario tiene las mismas características del escenario 2 y 10, en cuestión de estratificación del suelo y ubicación del nivel freático, excepto la altura. Se puede notar que existe una tendencia

similar de los desplazamientos respecto a estos escenarios, sin embargo, las magnitudes son mayores en este escenario respecto al 2 y 10.

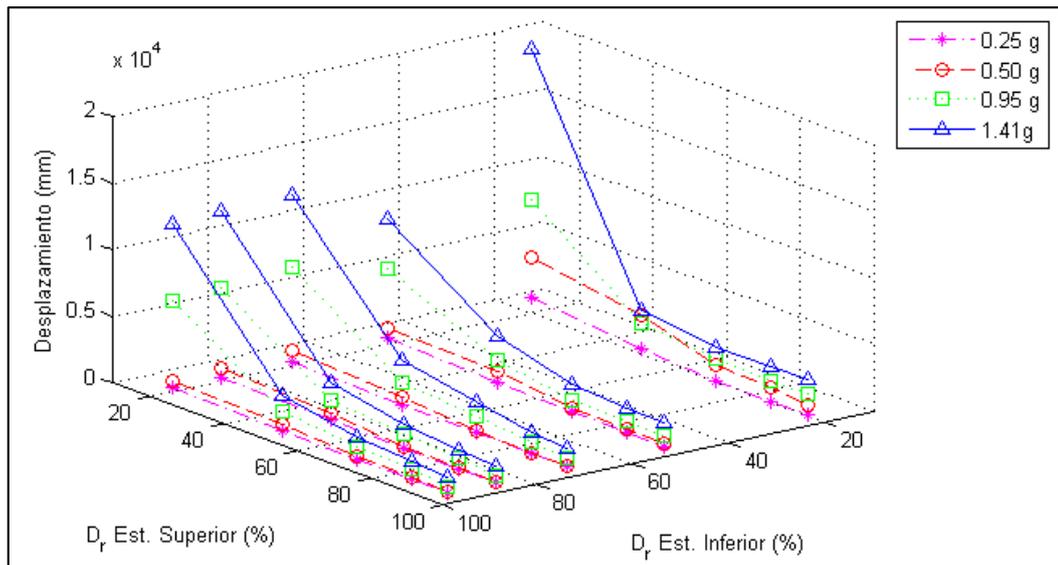


Figura 108. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 13, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

Para el escenario 2, de 15 m de altura de la columna de suelo, el caso crítico de desplazamiento en porcentaje representa menos del 40% de la altura; al igual que en el escenario 10, de 30 m de altura, para el caso crítico de este escenario 13, el desplazamiento máximo representa 33% de la altura de la columna de suelo, y los demás desplazamientos se mantienen menores al 20% según la Figura 109.

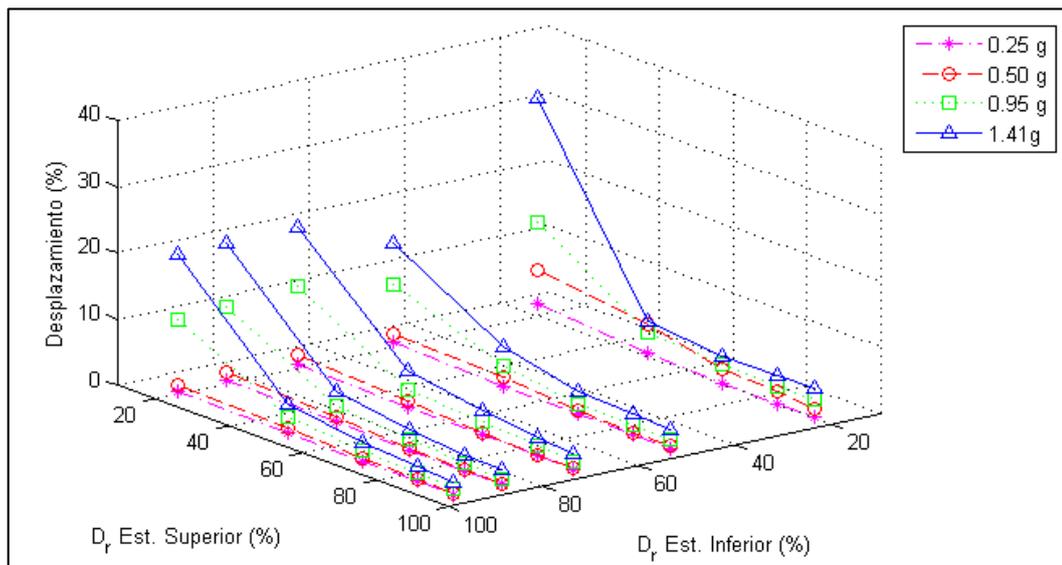


Figura 109. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 13, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático en la superficie del terreno.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.13.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Se puede ver en la Figura 110 que los modelos con cualquier combinación de densidad relativa en sus estratos, a partir de la intensidad de sismo de 0.50 g en su totalidad presentan licuefacción. En la intensidad de 0.25 g las combinaciones de estratos con arenas de moderadas a muy densas, no llegan a activar la licuefacción. A pesar de que la relación de presión de poros en las intensidades de carga mayores a 0.50 g no tienen picos que sobrepasan 1.5 veces el exceso de presión de poros, el comportamiento de este escenario es muy parecido al del escenario 2 y 10, donde se tiene las mismas condiciones de escenario variando únicamente la altura de la columna de suelo.

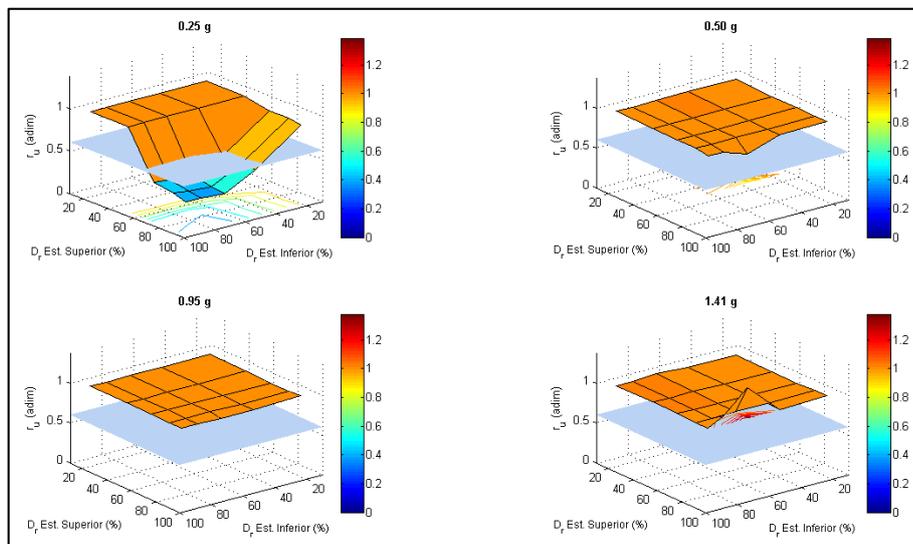


Figura 110. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 13 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.14. Escenario 14.

El escenario 14, tiene 60 m de altura y 2 m de ancho de la columna de suelo, 0 % de pendiente, ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna y asociación de estratos Uniforme Tipo 2. En este escenario también se tiene ciertas modelaciones que no lograron converger y corresponden a los modelos de intensidades de sismo de 0.95 g que tienen densidad relativa de 20 % en el estrato inferior para todas las combinaciones de densidad relativa del estrato superior, las cuales coinciden con el escenario 4 y 12 de 15m y 30m de altura de la columna de suelo respectivamente, que presentan las mismas condiciones de estratificación del suelo y ubicación del nivel freático.

##### 4.3.14.1. Gráficas de desplazamiento.

De acuerdo a la Figura 111 se tiene que los desplazamientos para este escenario son menores a 50 cm en los modelos que convergen; para la intensidad sísmica más alta (1.41 g)

y densidad relativa del estrato inferior de la columna de suelo suelta tienen desplazamientos altos respecto a las demás modelaciones. En este escenario los modelos que no presentan licuefacción tienen desplazamientos menores a 30 cm (Figura 111).

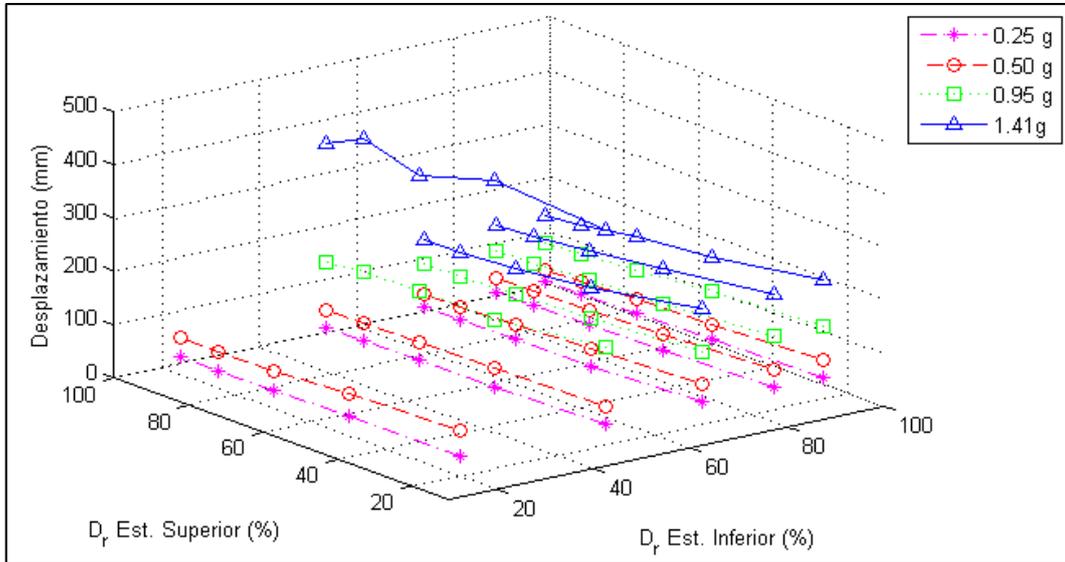


Figura 111. Resultados de los desplazamientos máximos del escenario 14, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

En la Figura 112 se observa que los desplazamientos de este último escenario, se mantienen menores al 1 % de la altura de la columna de suelo, aún para las intensidades más altas de sismo.

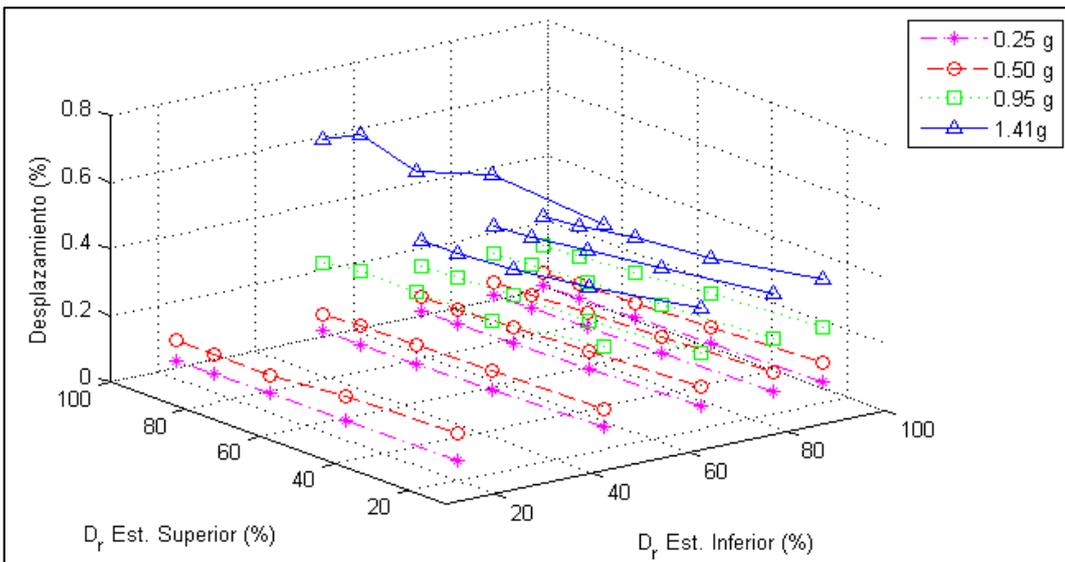


Figura 112. Desplazamientos máximos obtenidos como porcentaje de la columna de suelo del escenario 14, para diferentes intensidades de cargas sísmicas y nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.14.2. Gráficas de la relación de presión de poros.

Para este escenario cuando se tiene intensidad de sismo de 0.25 g ningún modelo presenta licuefacción. En el caso de las demás intensidades de sismo, incluso la mayor de 1.41 g, en los modelos donde el estrato inferior de la columna de suelo tiene densidad relativa suelta o muy suelta, independientemente de la densidad relativa del estrato superior, se presenta el fenómeno de licuefacción como se puede notar en la Figura 113. A diferencia del escenario 4 y 12, que también tienen el nivel freático ubicado a la mitad de la columna de suelo, con las mismas condiciones de estratificación del suelo, en este escenario la licuefacción, solo se presenta cuando el estrato inferior que conforma la columna de suelo tiene densidad relativa menor al 50 %.

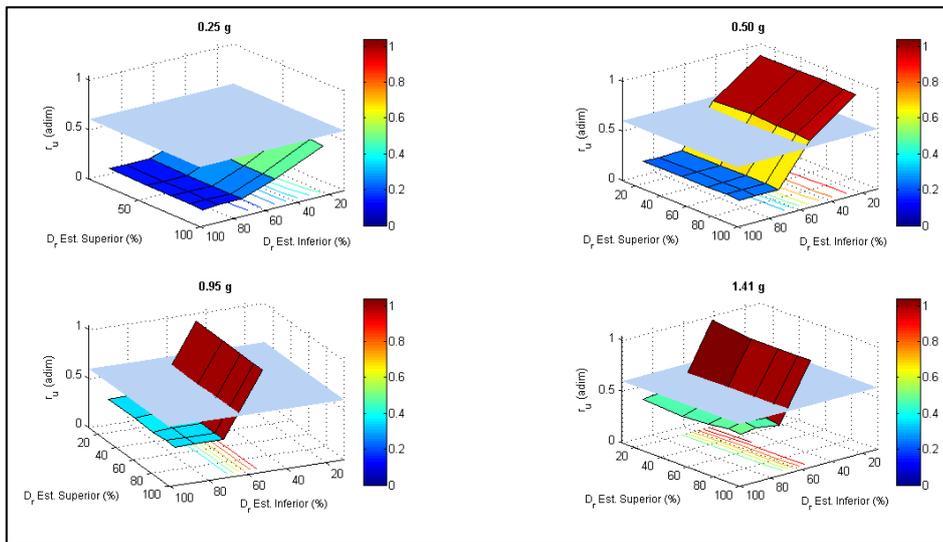


Figura 113. Valores máximos de la relación de presión de poro, obtenidas para el escenario 14 en función de la densidad relativa del estrato inferior y del estrato superior, para cada intensidad de sismo.

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.3.15. Porcentajes de reducción de la tensión efectiva inicial y del esfuerzo de corte.

Por cada una de las modelaciones que componen los escenarios propuestos, se determinó el porcentaje de reducción, respecto a su capacidad inicial, de la tensión efectiva inicial y del esfuerzo de corte, los cuales se determinan respecto al máximo valor de relación de presión de poros de cada modelo. Luego se seleccionó los valores máximos y mínimos para los modelos de cada escenario cuando presentan la licuefacción del suelo y para cuando no logran activar dicho fenómeno, los resultados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Porcentajes de reducción máximos y mínimos de la tensión efectiva inicial y el esfuerzo de corte para cada uno de los escenarios propuestos, en los modelos donde se presenta el fenómeno de licuefacción de suelos, y cuando no se presenta dicho fenómeno.

Escenario	Nivel Freático	Cuando existe licuefacción				Cuando no existe licuefacción			
		Tensión Efectiva (%)		Esfuerzo de Corte (%)		Tensión Efectiva (%)		Esfuerzo de Corte (%)	
		Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
1	0H	96.97	29.24	97.60	20.51	29.13	4.76	92.26	15.96
2	0H	98.54	18.36	99.01	19.34	24.91	8.90	92.26	41.98
3	1/4H	91.77	40.55	98.72	21.82	42.70	14.20	90.66	28.89
4	1/2H	80.58	29.80	99.16	67.78	38.35	0.24	86.56	14.24
5	1H	-	-	-	-	37.86	0.00	97.77	0.00
6	0H	98.42	1.14	98.95	8.26	47.82	18.74	92.26	37.01
7	1/4H	88.38	61.12	98.99	50.05	42.70	15.26	91.51	28.89
8	1/2H	79.05	34.42	98.78	31.24	38.76	9.64	81.49	17.42
9	0H	98.47	3.22	98.93	15.88	24.91	17.92	92.26	49.67
10	0H	99.35	28.76	99.29	32.34	31.41	24.79	82.67	52.34
11	1/4H	91.03	34.52	98.37	41.84	38.55	3.24	73.34	10.67
12	1/2H	69.94	29.06	99.15	66.80	45.15	7.00	96.77	11.59
13	0H	98.64	20.47	98.66	15.05	41.76	14.05	93.39	37.24
14	1/2H	61.39	28.60	96.71	41.75	40.01	10.59	77.15	7.48

Fuente: Los Autores.

Elaboración: Los Autores.

#### 4.4. Análisis de los resultados de las modelaciones numéricas.

Con los resultados del escenario 1 se pudo notar que el desplazamiento no es indicativo directo de la licuefacción de suelos, a razón que los casos con mayores valores de densidad relativa presentaron un exceso de presión de poros que superaba a la tensión de confinamiento inicial en más de 2 veces, sin embargo, dentro de los desplazamientos que estos modelos generaron se mantienen menores a 1 m.

De acuerdo a los porcentajes de desplazamiento respecto a la altura de la columna de suelo, según el escenario 2, 10 y 13 de 15 m, 30 m y 60 m de altura respectivamente con las mismas condiciones de estratificación y ubicación del nivel freático, se ha logrado observar que los desplazamientos obtenidos tienen similitud de valores, con aproximadamente 35% de desplazamiento en relación a la altura respectiva, lo cual permite deducir que la altura de la columna de suelo, para las mismas condiciones de estratificación y ubicación del nivel freático no tiene influencia significativa.

Cuando el nivel freático se ubica a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna de suelo, para las mismas condiciones de estratificación en los escenarios 4, 12 y 14 de 15 m, 30 m y 60 m de altura respectivamente, se pudo notar que los modelos con problemas de convergencia se repiten

en los tres escenarios, observando así que la altura, no tiene influencia en la convergencia de la herramienta, sino los valores de densidad relativa de los estratos y la intensidad de carga sísmica del análisis.

La estratificación del suelo, como se pudo ver en los escenarios 4 y 8 que tienen la ubicación del nivel freático a  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna de suelo, pero asociación de estratos uniforme y creciente respectivamente, no tiene influencia significativa en el fenómeno de licuefacción, debido a que aproximadamente la misma cantidad de modelos, con las mismas características de variación de la densidad relativa e intensidad de carga sísmica, presentaron licuefacción.

Se ha logrado determinar que, en presencia de nivel freático, independientemente de la estratificación de la columna de suelo, se presenta el fenómeno de la licuefacción.

En los escenarios 4, 8, 12 y 14 donde el nivel freático se ubica a la mitad de la altura de la columna de suelo, se observó que bajo intensidades de sismo pequeñas la licuefacción del suelo muy probablemente no se presente, pero conforme aumenta la intensidad del sismo, los estratos de arenas densas al igual que las sueltas presenten el fenómeno de licuefacción.

De acuerdo con el (Geotechnical Engineering Bureau, 2015) la licuefacción de suelos tiene mayor incidencia en arenas saturadas que tienen densidades relativas menores al 50%, y aunque menciona que para densidades relativas de 75% en adelante no se presenta, se pudo verificar que el fenómeno ocurre cuando la carga sísmica es mayor a 0.95 g, de acuerdo a los escenarios 2, 6, 9, 10 y 13 los cuales tienen el nivel freático superficial; incluso si la altura de la columna de suelo es pequeña, como se da en los escenarios de 15 m de altura de columna, con intensidades de 0.50 g, se puede llegar a activar la licuefacción de suelos. De igual manera, se pudo corroborar que independientemente de la carga sísmica y estratificación de la columna de suelo, se llega a producir el fenómeno de licuefacción en los suelos con arenas principalmente sueltas o muy sueltas.

Según (Vallejo, 2002), cuando la altura de la columna de suelo es mayor a 15 m, es menos probable que el suelo licúe, los escenarios propuestos con altura de 15 m mientras tengan una ubicación del nivel freático importante, de hasta  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna del suelo, con determinadas cargas sísmicas llegan a licuar, mientras que en los escenarios con alturas de 30 m y 60 m se presenta el fenómeno de licuefacción para modelos que tienen combinaciones de densidades relativas muy sueltas y sueltas con cargas sísmicas importantes, confirmando la hipótesis planteada.

La pendiente no es una variable de análisis para la investigación, no obstante, cuando se modele una columna de suelo con pendiente considerable, este factor podría generar grandes desplazamientos por la inestabilidad del terreno, donde los valores de la relación de presión

de poros sean bajos; esta situación indica que no ocurre licuefacción del suelo, pero si un importante deslizamiento en la columna modelada. Además, se presente o no el fenómeno de licuefacción, se pudo observar que, para los escenarios propuestos, los resultados de los desplazamientos mantienen cierta tendencia que consiste en presentar desplazamientos de mayores valores cuando la combinación de estratos en la columna de suelo tiene densidades relativas muy sueltas, y desplazamientos de menores valores conforme se densifican los estratos

García Núñez (2007) menciona que la licuefacción de suelos se presenta cuando el espesor del estrato superior no licuable es menor a 8 m, acuerdo a los modelos de la estratificación decreciente, que corresponden al escenario 9, se tiene que efectivamente gran parte de los modelos licúan. No se presenta el fenómeno para los modelos que tienen intensidad de sismo de 0.25 g y combinaciones de arenas sueltas a muy densas en el estrato superior con 3.50 m de espesor.

Cuando el nivel freático se ubica en profundidades menores que 3 m, como en los escenarios 1, 2, 6, 9, 10 y 13, la gran mayoría de modelos que componen dichos escenarios presentan el fenómeno de licuefacción, con excepción en los modelos que tienen densidades relativas más densas y cargas de sismo menores, pero conforme el nivel freático disminuye respecto a la profundidad de la columna de suelo, se reducen los modelos que presentan licuefacción, lo cual se observa en los demás escenarios que tienen el nivel freático ubicado a  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  de la altura de la columna, comprobando lo propuesto por Vallejo (2002): con el nivel freático a profundidades mayores de 5 m se tiene menos probabilidades de activar la licuefacción de suelos.

En los escenarios donde el nivel freático se ubica en la superficie de la columna de suelo (0H), para la gran mayoría de los modelos, la presión de poros excede a la tensión de confinamiento inicial del suelo, en relaciones iguales o mayores a la unidad, cuando la ubicación del nivel freático disminuye respecto a la altura de la columna de suelo, para las cargas sísmicas altas propuestas de 0.95 g y 1.41 g, la licuefacción de suelo en dichos modelos alcanza su estado total ( $r_u = 1$ ), pero conforme disminuye la aceleración del sismo y las combinaciones de los estratos de la columna de suelo se conforman por densidades relativas de 70 % en adelante, solo se llega al estado de licuefacción inicial ( $r_u > 0.6$ ).

Los sismos que generan el fenómeno de licuefacción son los que presentan aceleraciones iguales o mayores a 0.20 g de acuerdo a (Vallejo, 2002), ello se pudo comprobar con la intensidad de sismo muy leve de 0.065 g del primer escenario, donde ningún modelo correspondiente con esta carga sísmica produjo licuefacción. En la intensidad de 0.25 g, los

modelos que presentaron licuefacción de suelo con mayor incidencia son los que en el estrato inferior de la columna de suelo, dependiendo de la ubicación del nivel freático, tenían densidades sueltas o muy sueltas. A partir de las siguientes intensidades de sismo, con una columna de suelo totalmente saturado, se logra comprobar que se produce el fenómeno de licuefacción de suelos, a medida que el nivel freático se ubica a menor profundidad en la columna de suelo, solo las cargas de sismo más altas producen la licuefacción de suelos.

En los escenarios donde el nivel freático se encuentra en la superficie del terreno, cuando el suelo no licua, el porcentaje de reducción de la tensión de confinamiento inicial es menor al 30% (Escenario 1), menor al 50% (Escenario 6), menor a 25% (Escenario 9), menor al 32% (Escenario 10), menor a 42% (Escenario 13), de acuerdo a la Tabla 27. Los tres primeros escenarios tienen una altura de columna de 15 m con estratificación Uniforme, Creciente y Decreciente respectivamente, notándose que cuando se tiene la asociación de estratos de forma creciente se reduce de forma significativa la tensión inicial, a pesar de no producirse la licuefacción de suelos. Sin embargo, cuando el suelo si licúa, para los escenarios mencionados, los porcentajes de la tensión de confinamiento se reducen en casi el 100% de la resistencia inicial.

Cuando no existe presencia del nivel freático (Escenario 5), la reducción de la tensión de confinamiento inicial del suelo, está en un promedio de 5.50 %, lo cual no se considera un valor representativo, dada la magnitud del sismo, a pesar de que existe un caso crítico donde la tensión se reduce en aproximadamente 38% (Tabla 27).

La resistencia al corte de la arena, si se ve afectada, independientemente de la aceleración de la carga sísmica y del nivel freático, puesto que los valores máximos de la reducción de este parámetro, para todos los escenarios se mantiene mayor a 95%, para los modelos donde se presenta la licuefacción de suelo (Tabla 27), observando que la resistencia al corte se pierde casi en su totalidad para los modelos que componen los escenarios, incluso para los modelos donde no se presenta la licuefacción de suelos, los porcentajes de reducción son considerables, llegando a un valor máximo de 93.4%, en los escenarios donde el nivel freático se encuentra en la superficie del terreno.

## CONCLUSIONES

Se ha generado una herramienta informática para analizar el fenómeno de licuefacción de suelos mediante el pre y post proceso de un modelo numérico, ejecutado en el software OpenSees, el cual simula una columna de suelo en dos dimensiones con la aplicación de una carga sísmica en la base de la misma. El pre – proceso consiste en establecer las propiedades geotécnicas del suelo, geometría de la columna y carga sísmica que definen el modelo a analizarse; y el post – proceso presenta de forma gráfica los resultados de desplazamiento, aceleración, esfuerzos axiales, deformaciones y presión de poro en función del tiempo de análisis o profundidad de la columna de suelo.

La herramienta informática ha sido validada contrastando los resultados obtenidos en el modelo numérico base y la herramienta informática generada; el error presentado fue de 0 % en todas las modelaciones. La validación se realizó en escenarios de columna de suelos no cohesivos, desde arenas muy sueltas a muy densas, con pendiente menor al ángulo de reposo del suelo e intensidad sísmica menor 1.5 g.

El uso de la herramienta informática para la modelación de diversos escenarios ha permitido comprobar ciertos fundamentos teóricos sobre la ocurrencia de la licuefacción de suelos, tales como la influencia del nivel freático, la densidad relativa de los suelos o la intensidad de carga sísmica.

En el análisis del fenómeno de licuefacción, se comprobó que la ubicación del nivel freático es la variable de mayor incidencia; donde los suelos saturados son altamente susceptibles a comportarse como un fluido, mientras que este potencial disminuye si el nivel freático se encuentra a mayores profundidades respecto a la altura de la columna de suelo.

Se observó que la magnitud del desplazamiento no es indicativo directo de la licuefacción del suelo, dado que modelaciones donde se activó la licuefacción se presentaron desplazamientos pequeños así como desplazamientos considerables en magnitud.

Se pudo notar que el fenómeno de licuefacción en una columna de suelo se activa para determinadas intensidades de sismo, en suelos densos ( $D_r > 85\%$ ) se requiere intensidades cercanas a 1 g, y en suelos poco firmes ( $D_r < 50$ ), intensidades desde 0.25 g producen licuefacción.

La altura de la columna de suelo no tiene influencia significativa en la manifestación del fenómeno de licuefacción de suelos cuando las condiciones de intensidades de carga sísmica, densidades relativas y estratificación del suelo sean las mismas.

Conforme se disminuyó el nivel freático en las modelaciones realizadas, las variables que más influyeron en la activación de la licuefacción son la densidad relativa del suelo y la intensidad del sismo, se incrementan las probabilidades de que el fenómeno de licuefacción se presente cuando la densidad relativa es suelta ( $D_r < 50 \%$ ) y las cargas sísmicas mayores a 1 g.

Independientemente de la carga sísmica y la configuración de estratos en la columna de suelo, la licuefacción del suelo se presentó en arenas sueltas o muy sueltas con el nivel freático ubicado a profundidades menores de la mitad de la altura de la columna de suelo.

El potencial de licuefacción de suelos no presentó variaciones debido a la estratigrafía siempre y cuando la altura de columna de suelo y el nivel freático se mantengan constantes.

## RECOMENDACIONES

Con la investigación realizada se observó la importancia del estudio de la licuefacción de suelos, la magnitud de daños y desastres que dicho fenómeno puede generar a partir de un evento sísmico, por lo que se recomienda su consideración en estudios geotécnicos, diseños, planificaciones urbanas, entre otros, con los diversos métodos que existen para su análisis incluyendo el uso de la herramienta implementada en esta investigación.

Para evitar errores de convergencia dentro del uso de la herramienta generada se debe evitar combinar densidades relativas de suelo muy sueltas ( $D_r < 30\%$ ) con intensidades de sismo muy altas ( $> 1\text{ g}$ ), a razón de que los resultados podrían no generarse o bien llegar a presentar valores excesivamente altos en los desplazamientos, presión de poro u otros parámetros.

En el ingreso de información durante el pre – proceso, se recomienda limitar el parámetro de la pendiente del terreno a valores menores al ángulo de reposo del suelo para evitar errores de convergencia durante las modelaciones con la herramienta generada.

Los resultados de las modelaciones que realice la herramienta no pueden utilizarse como un criterio único para evaluar el potencial de licuefacción de un suelo, dado que es una aproximación matemática a un modelo real, por lo que, al momento de evaluar dicho fenómeno, se debe acompañar estos resultados con los obtenidos por otros métodos a consideración del usuario, para fomentar un criterio más sólido.

Con el fin de ampliar el alcance de la herramienta informática generada, se recomienda fortalecer el modelo numérico de tal manera que sea posible involucrar combinaciones de densidades relativas sueltas, valores altos de pendiente superficial e intensidades de carga sísmica mayores a  $1\text{ g}$  durante la modelación de columnas de suelo.

Esta herramienta informática es el inicio para investigaciones más íntegras en las que se pueda añadir a la programación de la misma, el análisis para suelos cohesivos, y optimizar la convergencia para las condiciones límite que ahora presenta la herramienta.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials. (2004). Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil (ASTM D5311 - 11). Recuperado el 21 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5311-11.htm>
- American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices (ASTM D 4015). Recuperado el 23 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.astm.org/Standards/D4015.htm>
- Botero, J. C. (2002). Respuesta de Sistemas Suelo-Estructura con amortiguamiento en la base. Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <http://www.redalyc.org/pdf/215/21512506.pdf>
- Castillo Jaramillo, D. I. (2013). Peligro sísmico de la Cuenca de Loja-Ecuador. Recuperado a partir de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/8324>
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. Pearson Educación.
- Colindres Selva, R. (1983). *Dinámica de suelos y estructuras* (Primera). México, D. F.: LIMUSA.
- Das, B. M. (2013). *Fundamentals of geotechnical engineering* (4th ed). Stamford, CT: Cengage Learning.
- Das, B. M., & Ramana, G. V. (2010). *Principles of Soil Dynamics* (Second Edition). Cengage Learning.
- Delgado, J. (2011). Efectos geotécnicos de los terremotos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19(3), 276–288.
- Di, Y., & Sato, T. (2004). A practical numerical method for large strain liquefaction analysis of saturated soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(3), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.11.004>

- Dobry, R., & Liu, L. (1994). Centrifuge modelling of soil liquefaction. Presentado en Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering: 19-24 July 1992, Madrid, Spain, Rotterdam: Balkema.
- García Núñez, J. R. (2007). *Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. Aplicación Tumaco (Colombia)*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Georgiannou, V. N., Rampello, S., & Silvestri, F. (1991). Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays (Vol. 1).
- Geotechnical Engineering Bureau. (2015, agosto). GEOTECHNICAL DESIGN PROCEDURE: LIQUEFACTION POTENTIAL OF COHESIONLESS SOILS. Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/>
- Gil, A. C., & Alcayhuamán, L. (2016). Licuación de suelos durante el sismo Pisco-Perú-2007. *Perfiles de Ingeniería*, 1(10).
- González Fuentealba, J. P. (2015). Estudio del fenómeno de licuefacción en Chile para el terremoto del Maule, 2010. *Repositorio Académico - Universidad de Chile*. Recuperado a partir de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137848>
- González, O., Herrera, M., Coronel, I., E, C., & López, E. (2013). Análisis de los modelos constitutivos empleados para simular la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 75–80.
- GSE. (2013, febrero 25). List of finite element software packages. Recuperado el 26 de septiembre de 2017, a partir de <http://www.globalstressengineers.info/2013/02/list-of-finite-element-software-packages/>
- Hibbeler, R. (2010). *Ingeniería Mecánica: Dinámica*. Recuperado el 24 de octubre de 2017, a partir de <https://www.casadellibro.com/libro-ingenieria-mecanica-dinamica-12-ed/9786074425604/1775512>
- Huang, Y., & Yu, M. (2017). *Hazard Analysis of Seismic Soil Liquefaction*. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4379-6>
- Hurtado Gómez, J. E. (2000). *Introducción a la Dinámica de Estructuras (Primera)*. Universidad Nacional de Colombia.

- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Ishihara, K., & Koga, Y. (1981). Case Studies of Liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake. *Soils and Foundations*, 21(3), 35–52. [https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.3\\_35](https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.3_35)
- Jefferies, M., & Been, K. (2015). *Soil Liquefaction: A Critical State Approach, Second Edition*. CRC Press.
- Kearey, P., Klepeis, K. A., & Vine, F. J. (2009). *Global tectonics* (3rd ed). Oxford ; Chichester, West Sussex ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Kramer, S. L. (1988). Triggering of liquefaction flow slides in coastal soil deposits. *Engineering Geology*, 26(1), 17–31.
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2004). Geotechnical Aspects of Seismic Hazard. *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*, 107.
- Lew, M. (1984). Risk and Mitigation of Liquefaction Hazard. Presentado en Proceedings of the eighth world conference on earthquake engineering, San Francisco, California. Recuperado a partir de <http://www.nicee.org/wcee/index2.php>
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2007). *Open System for Earthquake Engineering Simulation - User Command-Language Manual*. Berkeley: University of California.
- Mendoza Herrera, J. (2014). Influencia de la granulometría en la licuación de arenas. *Tecnología MOPT vol. 20-21, 2012-2014*. Recuperado a partir de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/206>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda - Ecuador. (2014, agosto). Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC-SE-DS - Cargas Sísmicas Diseño Sismoresistente. Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-DS.pdf>
- Mussio, V. (2012). *Potencial de licuación mediante el método de microtemores en la Colonia Solidaridad Social, Mexicali*. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

- Recuperado a partir de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5177/tesis.pdf.pdf?sequence=1>
- NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN 2011. (2011). Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-02-peligro-sismico-y-requisitos-de-disec3b1o-sismo-resistente-021412.pdf>
- Obando, T. (2009). Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a sollicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos. Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <https://es.scribd.com/document/48072470/cuantificacion-potencial-licuacion-suelos>
- Oliveira, C. S., Roca, A., & Goula, X. (Eds.). (2006). *Assessing and managing earthquake risk: geo-scientific and engineering knowledge for earthquake risk mitigation: developments, tools, techniques*. Dordrecht: Springer.
- Pathak, S. R., Dalvi, R. S., & Katdare, A. D. (2010). Earthquake Induced Liquefaction using Shake Table Test. Recuperado a partir de <http://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/05icrageesd/session04/13/>
- PEER. (2006). OpenSees - About. Recuperado el 26 de septiembre de 2017, a partir de <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/home/about.php>
- PEER. (2012, mayo 10). Welcome to the OpenSeesWiki. Recuperado el 26 de septiembre de 2017, a partir de [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Main\\_Page](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Main_Page)
- Polonio B., L. M., & Lindao B., J. V. (2014). *Evaluación del potencial de licuefacción de suelos en la zona de Chipipe del cantón Salinas* (B.S. thesis). La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2015. Recuperado a partir de <http://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/2291>
- Prasad, S. K., Towhata, I., Chandradhara, G. P., & Nanjundaswamy, P. (2004). Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. *Current science*, 1398–1404.

- Rees, S. (2013, abril). Introduction to triaxial testing (Part 1). En *GDS Instruments* (p. 4). Recuperado a partir de <http://www.gdsinstruments.com/information/white-paper-introduction-to-triaxial-testing>
- Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., & Yopez, H. (2007). Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador - Instituto Geofísico - EPN. Recuperado el 24 de octubre de 2017, a partir de <http://www.igepon.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/35-breves-fundamentos-sobre-los-terremotos-en-el-ecuador>
- Rodríguez Segurado, M. (2005). Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Recuperado a partir de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3363>
- Santibañez Rodríguez, D. H. (2006). Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2016, mayo 16). INFORME DE SITUACION N°65 – 16/05/2016 Terremoto 7.8 ° - Pedernales. Recuperado el 24 de octubre de 2017, a partir de <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/05/Informe-de-situaci%C3%B3n-n%C2%B065-especial-16-05-20161.pdf>
- Seed, B. H., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 458–482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(458))
- Seed, B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 92(SM6). Recuperado a partir de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=38714>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*. Recuperado a partir de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=127844>

- Seed H. Bolton. (1987). Design Problems in Soil Liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 827–845. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1987\)113:8\(827\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:8(827))
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Earth: an introduction to physical geology* (8th ed). Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall.
- Ter-Martirosyan, A., Sobolev, E., & Merkin, V. (2016). Measures to Protect Buildings and Constructions Against Dynamic Liquefaction of Soils. *Procedia Engineering*, 165, 1348–1352. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.863>
- Universidad de Costa Rica. (s.f.). Laboratorio de Ingeniería Sísmica. Recuperado el 13 de noviembre de 2017, a partir de [http://www.lis.ucr.ac.cr/clase\\_index/tv/inicio/faq/proyecto.html](http://www.lis.ucr.ac.cr/clase_index/tv/inicio/faq/proyecto.html)
- USGS. (s.f.a). Earthquake Glossary: Ring of Fire. Recuperado a partir de <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=Ring%20of%20Fire>
- USGS. (s.f.b). Earthquake Glossary: Spectral Acceleration (SA). Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de [https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=spectral%20acceleration%20\(SA\)](https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=spectral%20acceleration%20(SA))
- Vallejo, L. I. G. de. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación.
- Wang, C., & Manga, M. (2009). *Earthquakes and Water* (Vol. 114). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00810-8>
- World Nuclear Association. (2016). Nuclear Power Plants and Earthquakes. Recuperado el 25 de octubre de 2017, a partir de <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/nuclear-power-plants-and-earthquakes.aspx>
- Yang, Z. (2012). Four Node Quad u-p Element - OpenSeesWiki. Recuperado el 26 de octubre de 2017, a partir de [http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Four\\_Node\\_Quad\\_u-p\\_Element](http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Four_Node_Quad_u-p_Element)
- Youd T. L., & Idriss I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction

Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297–313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))

Zienkiewicz, O. C., Chan, A. . H. . C. ., M. Pastor, & T. Shiomi. (1987). Computational Approach to Soil Dynamics. *Soils Dynamic and Liquefaction, Developments in Geotechnical Engineering* 42(1).

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The finite element method: its basis and fundamentals* (Seventh edition). Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann.

## **ANEXOS**