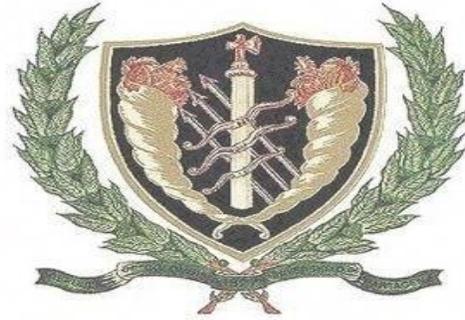


CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO Y EVALUACIÓN
SÍSMICA EN EL SECTOR GETSEMANÍ EN LA CIUDAD DE CARTAGENA
DE INDIAS



INVESTIGADORES:

DARWIN ESCORCIA TATIS

JESÚS HERRERA CASSERES

DIRECTOR: ING. GUILLIAM BARBOSA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA D.T. Y C.

2017



CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO Y EVALUACIÓN SÍSMICA EN EL SECTOR GETSEMANÍ EN LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN: GEOMAVIT

LINEA DE INVESTIGACIÓN: GEOAMENAZAS

INVESTIGADORES:

DARWIN ESCORCIA TATIS

JESÚS HERRERA CASSERES

DIRECTOR: ING. GUILLIAM BARBOSA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

CARTAGENA D.T. Y C.

2017



NOTA DE ACEPTACION

Firma del director

GUILLIAM BARBOZA MIRANDA

Firma del jurado

MODESTO BARRIOS FONTALVO

Firma del jurado

ARNOLDO BERROCAL OLAVE

Cartagena de indias, ____ de _____ del 2017



AGRADECIMIENTOS

Le agradecemos a Dios por todas las oportunidades que nos ha brindado en esta etapa de nuestras vidas y nuestra carrera, por todos los momentos vividos. Por darnos fuerzas y fe para creer que todo esto es posible.

Le agradecemos a nuestros padres por brindarnos la confianza y el apoyo necesario en el transcurso de nuestras vidas. Sin duda han sido lo mejor de esta etapa universitaria, ayudándonos a corregir nuestras faltas y celebrando nuestros triunfos.

A nuestro director brindarnos sus conocimientos y ayudarnos a cumplir este objetivo, y a los ingenieros civiles al proporcionarnos información necesaria para desarrollar el presente trabajo.



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| RESUMEN | 16 |
| ABSTRACT..... | 17 |
| INTRODUCCION | 18 |
| 1. MARCO REFERENCIAL..... | 22 |
| 1.1. ESTADO DEL ARTE..... | 22 |
| 1.2. MARCO TEORICO..... | 31 |
| 1.2.1. TERREMOTO | 31 |
| 1.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO..... | 34 |
| 1.2.2. LICUEFACCIÓN DE SUELO..... | 35 |
| 1.2.3. ONDAS ELÁSTICAS EN DEPÓSITOS DE SUELOS..... | 44 |
| 2. OBJETIVOS | 49 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL..... | 49 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 49 |
| 3. ALCANCE..... | 50 |
| 3.1. DELIMITACION ESPACIAL..... | 50 |
| 3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL | 51 |
| 3.3. ALCANCE CONCEPTUAL | 52 |



| | | |
|--------|---------------------------------------------------------|----|
| 3.4. | RESULTADOS | 52 |
| 3.5. | PRODUCTOS | 53 |
| 3.6. | LIMITACIONES | 53 |
| 4. | METODOLOGÍA | 54 |
| 4.1. | RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN | 55 |
| 4.2. | CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA | 56 |
| 4.3. | MODELO GEOLÓGICO–GEOTÉCNICO | 56 |
| 4.4. | POTENCIAL DE LICUACIÓN | 57 |
| 4.5. | COMPORTAMIENTO SISMICO | 57 |
| 4.6. | VULNERABILIDAD SÍSMICA | 58 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 59 |
| 5.1. | CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA | 59 |
| 5.1.1. | RECOPIACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN | 59 |
| 5.1.2. | CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE SONDEOS | 64 |
| 5.2. | MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO | 79 |
| 5.2.1. | MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO | 80 |
| 5.3. | EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN Y EXPANSIÓN | 84 |
| 5.3.1. | ANÁLISIS DE POTENCIAL DE LICUACION | 84 |
| 5.3.2. | RESULTADOS | 89 |
| 5.4. | COMPORTAMIENTO SÍSMICO | 90 |



| | |
|-----------------------------------------------|-----|
| 5.4.1. ANÁLISIS DE RECURRENCIA SÍSMICA..... | 90 |
| 5.4.2. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE..... | 94 |
| 5.4.1. CLASIFICACIÓN DE PERFIL DE SUELO | 102 |
| 5.4.2. PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN | 104 |
| CONCLUSIONES | 107 |
| RECOMENDACIONES..... | 111 |
| Obras existentes | 111 |
| Obras Nuevas | 112 |
| BIBLIOGRAFÍA | 114 |



TABLA DE IMÁGENES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1. Licuefacción por el terremoto de Japón en 2011 – CC. Fuente: foto tomada por Scott Ashford, courtesy of Oregon State University https://www.flickr.com/photos/oregonstateuniversity/5619603229/in/photostream/ | 37 |
| Ilustración 2. Efectos de licuefacción tras un seísmo en Japón en 1964. Fuente: Dominio Público (Wikipedia)..... | 38 |
| Ilustración 3. Relación típica entre esfuerzos inducidos y esfuerzos críticos. Fuente: (Dr. Obando, 2009)..... | 39 |
| Ilustración 4. Factor r_d vs profundidad..... | 40 |
| Ilustración 5. Curvas de la relación CRR para diferentes contenidos de finos y $M_w = 7.5$. Fuente: (Dr. Obando, 2009)..... | 42 |
| Ilustración 6. Correlación entre el comportamiento de licuefacción y la resistencia a la penetración. Fuente: (Dr. Obando, 2009)..... | 43 |
| Ilustración 7. Fronteras de licuación para sismos de diferente magnitud. Fuente: imagen tomada de Henríquez, C. (2007)..... | 44 |
| Ilustración 8. Onda de cuerpo que se dividen en primarias o de compresión (V_p) y secundarias o de cortes (V_s)...... | 45 |
| Ilustración 9. Propagación de ondas de superficie tipo Rayleigh. Fuente: Lazcano 2007..... | 47 |
| Ilustración 10. Onda Rayleigh y movimiento de partículas. Fuente: Lazcano 2007..... | 48 |
| Ilustración 12. Localización de Cartagena de indias..... | 50 |



| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 13 localización del área de estudio. Fuente: imagen tomada por Google maps. | 51 |
| Ilustración 13. Formato guía para descripción de sondeos. Fuente: Ing. Guilliam Barbosa | 60 |
| Ilustración 14. Formato guía de registro de perforaciones. Fuente: Ing. Guilliam Barboza..... | 61 |
| Ilustración 15. Gravedad especifica de suelos. Fuente: Ing. Felipe J.Q. | 62 |
| Ilustración 17. Mapa realizado en AutoCAD. Getsemaní. Fuente: Los autores..... | 64 |
| Ilustración 17. Modelo geológico-geotécnico Avenida Pedregal. Fuente: Los autores. | 80 |
| Ilustración 18. Modelo geológico-geotécnico Calle 2da de la Magdalena. Fuente: Los autores. | 81 |
| Ilustración 19. Modelo geológico-geotécnico Calle Media Luna. Fuente: Los autores. | 81 |
| Ilustración 20. Modelo geológico-geotécnico Calle del Pozo. Fuente: Los autores..... | 82 |
| Ilustración 21. Modelo geológico-geotécnico Calle Espíritu Santo. Fuente: Los autores..... | 82 |
| Ilustración 22. Modelo geológico-geotécnico Calle Larga-Esquina. Fuente: Los autores. | 83 |
| Ilustración 23. Modelo geológico-geotécnico Calle Lomba. Fuente: Los autores. | 83 |
| Ilustración 24. Modelo geológico-geotécnico Calle San Juan. Fuente: Los autores. | 84 |
| Ilustración 25. Formato guía para evaluar los esfuerzos mediante el número de golpes y la profundidad de los estratos Fuente: Ing. Guilliam Barbosa..... | 85 |
| Ilustración 26. Consulta en la red sismológica nacional. Fuente: (Servicio geológico colombiano) | 90 |
| Ilustración 27. Sismos no asignados para Cartagena r=100km. Fuente: (Servicio geológico colombiano) | 91 |
| Ilustración 28. Correlaciones según investigadores Fuente: Castillo, 2007 | 94 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Escala abierta de Richter..... | 33 |
| Tabla 2. Escala de Mercalli..... | 33 |
| Tabla 3. Textura y características del suelo | 35 |
| Tabla 4. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 2 metros. Calle San Juan..... | 66 |
| Tabla 5. Propiedades granulométricas profundidad 2 – 6 metros. Calle San Juan..... | 67 |
| Tabla 6. Propiedades granulométricas profundidad 0.5 – 1 metros. Calle Lomba N° 26a – 86... 68 | |
| Tabla 7. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 3 metros. Calle Lomba N° 26a – 86..... | 69 |
| Tabla 8. Propiedades granulométricas profundidad 0.5 – 7 metros. Calle Larga - Esquina..... | 70 |
| Tabla 9. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 2 metros. Calle Espíritu Santo No. 29 - 51..... | 71 |
| Tabla 10. Propiedades granulométricas profundidad 2 – 6 metros. Calle Espíritu Santo No. 29 - 51..... | 72 |
| Tabla 11. Propiedades granulométricas profundidad 0.8 – 2.5 metros. Calle del Pozo No. 25 – 153..... | 73 |
| Tabla 12. Propiedades granulométricas profundidad 2.5 - 6 metros. Calle del Pozo No. 25 – 153 | 74 |
| Tabla 13. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 9 metros. Calle Media Luna No. 9 - 36 | 75 |
| Tabla 14. Propiedades granulométricas profundidad 0.6 - 3.6 metros. Calle 2ª de la Magdalena N° 10 - 95..... | 76 |



| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 15. Propiedades granulométricas profundidad 3.6 - 7 metros. Calle 2ª de la Magdalena N° 10 - 95 | 77 |
| Tabla 16. Propiedades granulométricas profundidad 1 - 3.6 metros. Avenida del Pedral N° 29 - 153..... | 78 |
| Tabla 17. Propiedades granulométricas profundidad 3.6 - 5 metros. Avenida del Pedral N° 29 - 153..... | 78 |
| Tabla 18. Factores de Corrección para los Valores de N medidos en el SPT..... | 87 |
| Tabla 19. Magnitudes de sismos y cantidades de sismos | 92 |
| Tabla 20. Magnitud total..... | 92 |
| Tabla 21. Velocidad de onda de corte - Av. Pedregal | 95 |
| Tabla 22. Velocidad de onda de corte - Calle 2da de la Magdalena..... | 95 |
| Tabla 23. Velocidad de onda de corte - Calle Media luna..... | 96 |
| Tabla 24. Velocidad de onda de corte - Calle del Pozo..... | 96 |
| Tabla 25. Velocidad de onda de corte - Calle Espíritu Santo | 97 |
| Tabla 26. Velocidad de onda de corte - Calle Larga..... | 97 |
| Tabla 27. Velocidad de onda de corte - Calle Lomba..... | 98 |
| Tabla 28. Velocidad de onda de corte - Calle Sam Juan | 98 |
| Tabla 29. Velocidad de ondas de compresión - Av. Pedregal | 100 |
| Tabla 30. Velocidad de ondas de compresión - Cll. 2da de la Magdalena..... | 100 |
| Tabla 31. Velocidad de ondas de compresión - Cll. Media luna | 101 |
| Tabla 32. Velocidad de ondas de compresión - Cll. del Pozo | 101 |
| Tabla 33. Velocidad de ondas de compresión - Cll. Espíritu Santo | 101 |
| Tabla 34. Velocidad de ondas de compresión - Cll. Larga..... | 101 |



| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 35. Velocidad de ondas de compresión - Cll. Lomba..... | 102 |
| Tabla 36. Velocidad de ondas de compresión - Cll. San Juan..... | 102 |
| Tabla 37. Clasificación de perfil de suelos | 103 |
| Tabla 38. Velocidad de ondas de corte - sondeos de 25 m..... | 105 |
| Tabla 39. Periodo fundamental de vibración para sondeos de 25 m de profundidad | 106 |



TABLA DE ECUACIONES

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación (1) Relación de esfuerzos cortantes cíclicos | 40 |
| Ecuación (2) Módulo de rigidez | 46 |
| Ecuación (3) Módulo de elasticidad | 62 |
| Ecuación (4) Coeficiente de uniformidad | 62 |
| Ecuación (5) Ángulo de fricción interno | 62 |
| Ecuación (6) Peso unitario del suelo seco..... | 63 |
| Ecuación (7) Peso unitario del suelo húmedo..... | 63 |
| Ecuación (8) Presión de poros | 85 |
| Ecuación (9) Esfuerzo vertical..... | 86 |
| Ecuación (10) Esfuerzo vertical efectivo | 86 |
| Ecuación (11) Factor de reducción de esfuerzo..... | 86 |
| Ecuación (12) Corrección por presión de confinamiento | 88 |
| Ecuación (13) Corrección por contenidos de finos..... | 88 |
| Ecuación (14) Número de golpes corregidos..... | 88 |
| Ecuación (15) Coeficiente de resistencia cíclica | 88 |
| Ecuación (16) Corrección por plasticidad..... | 89 |
| Ecuación (17) Ecuación de Okamoto et at..... | 94 |
| Ecuación (18) Velocidad de onda de corte | 99 |
| Ecuación (19) Relación de Poisson..... | 99 |



| | |
|---------------------------------------------------------|-----|
| Ecuación (20) Modulo de rigidez al cortante máximo..... | 100 |
| Ecuación (21) Módulo dinámico | 100 |
| Ecuación (22) Periodo fundamental de vibración..... | 104 |



TABLA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Curva de magnitud sísmica con respecto a número de sismos presentados. Fuente: Los autores. 93



RESUMEN

En varios países del mundo se han realizado microzonificaciones sísmicas, estas están determinadas por estudios de suelo de zonas específicas, las cuales arrojan unos resultados que permiten caracterizar el suelo y evaluarlo sísmicamente.

Este estudio se orientó a realizar la caracterización geotécnica del sub suelo del sector de Getsemaní, con el fin de evaluar el comportamiento sísmico de la zona, mediante esto proponer recomendaciones para proteger la infraestructura del sector y siguiendo el anterior proceso, utilizar dicha información para una posible microzonificación sísmica.

Para realizar este proyecto se recopiló información sobre sondeos, registros de perforaciones y estudios de suelo existentes en la zona. Para desarrollar el presente tema, se analizó dicha información detalladamente, posteriormente se realizó una caracterización geotécnica del sub suelo teniendo en cuenta dicha información, luego se elaboró un modelo geológico-geotécnico tomando como base la caracterización geotécnica ya realizada y a información que se investigó. Luego se evaluó el potencial de licuación de la zona por medio de métodos empíricos con la ayuda del estudio SPT de los sondeos previamente recopilados, a continuación de esto se halló la velocidad de onda de corte del suelo de los diferentes sondeos y con ayuda de está, se hallaron otros parámetros necesarios para la evaluación sísmica del sector de Getsemaní. El resultado arrojado por este estudio concluyó que la mayoría del sector está compuesto por estratos arenosos, los cuales presentan potenciales de licuación bajos.



ABSTRACT

In several countries of the world have made microzoning seismic, these are determined by studies of soil in specific areas, which shed some results that allow to characterize the soil and to evaluate seismically. This study was aimed to perform the geotechnical characterization of the sub-soil sector of Gethsemane, in order to evaluate the seismic behavior of the area, using this to propose recommendations to protect the infrastructure of the sector, and following the above process, use this information for a possible microzonation seismic. To carry out this project information was gathered on surveys, logs of boreholes and studies of soil existing in the area. To develop this topic, we analyzed this information in detail, then conducted a geotechnical characterization of the sub soil, taking into account such information, then developed a geological model-geotechnical basis of the geotechnical characterization already performed and information that was investigated. Then we evaluated the potential of liquefaction of the area by means of empirical methods with the help of the study SPT of the surveys previously collected, then it was found the speed of shear wave in the soil of the various surveys and with the help of is, were found for other parameters needed for the evaluation of seismic sector of Gethsemane. The result yielded by this study concluded that the majority of the sector is composed of strata of sandy, which present potential of liquefaction low.



INTRODUCCION

A lo largo de la historia se han vivido muchas tragedias a causa de fenómenos naturales, que ocurren cuando uno menos se lo espera, estos fenómenos han cobrado muchas vidas y daños a las edificaciones. Últimamente se han presentado sismos a lo largo del globo terráqueo que han dejado huella en los países que los sufren, por esto se están tomando medidas para prevenir que estos fenómenos causen gran impacto. Como es de imaginar lo sismos se presentan sin dar aviso y dependiendo de su magnitud hacen más o menos daño, por esto importante siempre estar preparados para alguna de estas calamidades.

La ciudad de Cartagena cuenta con un nivel de sismicidad bajo pero los antecedentes sísmicos del país, muestran que Colombia posee fallas que cambien la estructura del subsuelo posicionando las placas de tal forma que pueda ocurrir de nuevo un sismo. Por tanto, a pesar que la ciudad tiene un nivel de sismicidad bajo, es importante tomar medidas y realizar estudios para averiguar qué tan preparada esta la ciudad a la hora que se presente un sismo, adoptar las medidas correctivas y preventivas que permitan reducir la vulnerabilidad de la infraestructura de la ciudad, para mitigar posibles daños a la población.

Con base en los registros sísmicos en la ciudad de Cartagena, el sismo de mayor magnitud hasta el momento ha sido de 6.1 en la escala de Richter en el año de 1975 y anterior a este se registraron tres sismos de magnitud 5.0, el más reciente fue en el año de 1998 con una



magnitud de 5.3¹. Teniendo esto como base se puede decir que si se han presentado sismos en la ciudad y no sabemos cuándo pueda ocurrir el próximo, por esto es necesario tomar medidas para estar preparados y más aún que esta ciudad cuenta con mucha infraestructura que se construyó hace mucho tiempo cuando no se le daba la importancia si la estructura es sismo resistente o no.

Un terremoto también llamado seísmo o sismo es un fenómeno de sacudida brusca y pasajera de la corteza terrestre producida por la liberación de energía acumulada en forma de ondas sísmicas.² En los últimos años se han presentado sismos alrededor del mundo que han destrozado la infraestructura del país donde este ocurre, un ejemplo de esto es lo ocurrido en Haití y Chile, en los cuales luego de un evento sísmico de gran magnitud, la infraestructura quedo destrozada, lo que tuvo un gran impacto en lo económico, social y cultural del país, por esto es importante estar cada vez más preparados para disminuir los efectos negativos de un sismo.

Un sismo, en general, se puede caracterizar por los siguientes parámetros: foco, magnitud, intensidad, contenido frecuencial que depende del tipo de falla generadora y de las características de los materiales que atraviesa durante su propagación, y duración que se puede relacionar con el tiempo transcurrido entre la primera y la última onda que superan un nivel de aceleración mínima dada³.

Cartagena es considerada patrimonio histórico y cultural de la humanidad, título que goza la ciudad desde 1984, para conservar este reconocimiento la UNESCO exige que se presente un

¹ (Bermudez Perez & Bohorquez Marrugo, 2003)

² (Cano, 2014)

³ (Bermudez Perez & Bohorquez Marrugo, 2003)



plan especial de manejo y protección del patrimonio (PEMP)⁴, por esto es importante realizar estudios que garanticen el buen estado de las infraestructuras de la ciudad, uno de estos estudios puede ser la caracterización del sub suelo, enfocado en los problemas que se puedan presentar a la hora de que ocurra un sismo.

Cartagena de Indias es una ciudad con mucha historia, esto se puede ver en las edificaciones de la ciudad de las cuales gran parte están ubicadas en el centro histórico de la misma y algunas de ellas han sido declaradas como patrimonio histórico de la humanidad. Como estas estructuras fueron construidas hace mucho y son de gran importancia para contar la historia de esta ciudad, lo cual la hace que sea muy apetecida para los turistas de todas partes del mundo, es importante no solo culturalmente sino también económicamente para la sociedad cartagenera, mantener este patrimonio. Es prioridad de los ingenieros civiles de la ciudad, realizar una caracterización del sub suelo del sector de Getsemaní para con base en esta, determinar la mejor forma de mantener las estructuras ya construidas y tener como base la información del estudio para próximas construcciones que se quieran realizar en la zona.

El sector de Getsemaní al quedar en una zona de característica de suelo de depósitos de playa, que puede ser susceptible a sufrir el fenómeno de licuación a la hora de presentarse un sismo, La licuación es una condición en la cual, un suelo pierde su resistencia y se comporta como un fluido muy viscoso, debido a la generación de altas presiones en el agua que se encuentra entre sus granos (presión de poros)⁵.

⁴ (¿Perderá Cartagena su título de Patrimonio de la Humanidad?, 2014)

⁵ (Bermudez Perez & Bohorquez Marrugo, 2003)



Este estudio es además un aporte a la seguridad de los habitantes de la ciudad, porque con los resultados que se derivarán del proyecto, se buscará proponer posibles soluciones en posibles zonas de riesgo, también con base en la información de este estudio, se pueden tomar medidas de prevención y protocolos de seguridad en caso que se dé un sismo. Al estar preparados se pueden disminuir posibles fatalidades y daños en las estructuras de la zona.

En esta investigación se realizaron estudios de suelo para identificar y caracterizar unidades litológicas, con base en esto, se establecieron zonas de comportamiento sísmico similar durante un sismo, para cada una de estas zonas, además de especificarse la fuerza sísmica posible, se identificaron los tipos de fenómenos asociados que se pueden desencadenar a raíz del sismo. Los resultados de este estudio sirvieron de base determinar si las edificaciones del sector de Getsemaní sufrirían a la hora de presentarse un sismo, si este sector llegara a ser vulnerable con base en los datos arrojados, se plantearon posibles soluciones al problema.

Con este estudio se pretende responder interrogantes como: ¿Cómo es el comportamiento sísmico del subsuelo en la zona? ¿Cómo es el potencial de licuación del subsuelo del sector de Getsemaní? ¿De qué estratos está compuesto el subsuelo del sector de Getsemaní?



1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ESTADO DEL ARTE

Durante los sismos, el movimiento del terreno puede causar una pérdida de la firmeza o rigidez del suelo que da como resultados el derrumbe de edificaciones, deslizamientos de tierra, daños en las tuberías, etc. El proceso que conduce a esta pérdida de firmeza o rigidez es conocido como licuación del suelo. Este fenómeno está principalmente, más no exclusivamente, asociado con suelos saturados poco cohesivos. El término licuación, incluye todos los fenómenos donde dan excesivas deformaciones o movimientos como resultado de transitorias o repetidas perturbaciones en estos suelos. Estudios similares se han realizado en otras partes del mundo como se trata a continuación:

- a) Evaluación del potencial de licuación de suelos en la ciudad de Moyobamba (Denys Parra M., Zenón Aguilar B., Carmen Ayquipa H., Jorge E. Alva H.) En este estudio se buscó identificar las zonas susceptibles a sufrir licuación en esta ciudad de Perú, posterior a esto se compararon los resultados con el fenómeno ocurrido durante los sismos de 1990 y 1991. Las propiedades de los suelos fueron calculadas por medio de calicatas y sondajes de exploración de suelos, como ensayos de penetración estándar y cono holandés. Mediante el sismo de diseño y la aceleración máxima en el sitio hallaron el potencial de licuación en distintos puntos de la zona y se demostró coincidencia de ocurrencia del fenómeno de licuación en lugares susceptibles a este. Para ello realizaron



un buen número de sondajes de la ciudad de Moyobamba y se recopilaron estudios existentes, dejando un banco de datos de vital importancia para el conocimiento del subsuelo en el futuro desarrollo de la ciudad, además de que los métodos simplificados de evaluación de potencial de licuación aplicados en Moyobamba, producen resultados semejantes. Por lo tanto es necesario conocer el perfil estratigráfico, características del subsuelo, nivel freático, resistencia a la penetración y el sismo de diseño para llevar a cabo el análisis, también se realizaron análisis de potencial de licuación en zonas bajas para un sismo de $M_s = 7.2g$ y $0.20g$ de aceleración superficial. Los resultados del análisis confirman la documentación sobre la ocurrencia del fenómeno en terremotos pasados. La metodología aplicada en este estudio es el resultado del trabajo iniciado por el CISMID en Chimbote algunos años atrás. Se propone posible la aplicación de esta metodología en otras ciudades de Perú, susceptibles a sufrir efectos del fenómeno de licuación⁶.

- b) La distribución y caracterización de suelos expansivos en Mongolia (Publicado en: Tecnología Estratégica (IFOST) 2011 6º Foro Internacional sobre (Volumen: 2); Fecha de la Conferencia: 22 hasta 24 agosto 2011; Página (s): 1327 – 1330 Imprimir; ISBN: 978-1-4577-0398-0 INSPECCIÓN; Número de Acceso: 12245770; Conferencia Lugar: Harbin, Heilongjiang DOI: 10.1109 / IFOST.2011.6021263; Editorial: IEEE) Distribución geológica y geotécnica de caracterización se resumieron de suelos expansivos en Mongolia. Los suelos expansivos se distribuyen en torno a un 35% del área total de Mongolia. Distribución de suelo expansivo se ilustra en un mapa geológico y los geológicos y de ingeniería geotécnica propiedades se indican para cada región en

6 (Aguilar B, Alva Hurtado, Ayquipa H., & Parra M, 1991)



una tabla. Para el período geológico, se señaló que los suelos expansivos en Mongolia formados en la final del Cretácico, era Mesozoica, a Neocene o Cuaternario de la era Terciaria. Hinchazón potencial es alto en la región Dundgobi-Sainshand y región Baganuur, es mediano Gurvan Saikhan, Zaamar y región Orkhon-Selenge y es baja en otras áreas.

- c) Espectroscopia para caracterizar suelos expansivos (Publicado en: Ciencias de la Tierra y el Simposio de Teledetección, 2007. IGARSS 2007. IEEE Internacional Fecha de la Conferencia: 23 hasta 28 jul 2007; Página (s): 1250 – 1254; E-ISBN: 978-1-4244-1212-9; Imprimir ISBN: 978-1-4244-1212-9; Conferencia Lugar: Barcelona, España; DOI: 10.1109 / IGARSS.2007.4423033; Editorial: IEEE) Los suelos expansivos son importantes geotécnicos peligros que plantean varios problemas en las obras de ingeniería que causan miles de millones de dólares en daños en muchas partes del mundo, especialmente en los lugares en los que hay diferencias climáticas significativas entre períodos secos y húmedos (Gourley et al., 1993; Nelson y Miller , 1992). Estos suelos se expanden o se hinchan cuando se humedecen y se contraen y se agrietan cuando se seca que implica enormes cambios de volumen. Por lo tanto, son de gran preocupación en el sector de la construcción. Identificación de suelos expansivos y caracterización de su comportamiento previsto debería hacerse de forma exhaustiva de la selección del sitio, diseño, y construcción de infraestructuras de ingeniería civil. Se requiere especial atención sobre todo cuando se trata de estructuras ligeras, como las infraestructuras de carreteras, aeródromos y pequeños edificios, etc. ya que la presión de la elevación del oleaje del suelo supera la presión a la baja ejercida a partir de tales estructuras. Sin embargo, los métodos convencionales estándar de evaluación de



los geotécnicos propiedades de suelos expansivos son caros, mano de obra y consume mucho tiempo. Además, no es posible obtener una representación continua de masas de suelo en el espacio. Así, la presencia y la distribución espacial de estos suelos pueden ser pasados por alto y sus tipos no pueden ser determinadas con precisión. Esto puede conducir a menores de toma de muestras de los sitios y posteriores especificaciones de diseño inadecuados. Por lo tanto, hay una necesidad de identificar y caracterizar suelos expansivos en un método más barato, rápido y continuo, en comparación con los métodos convencionales de evaluación de los geotécnicos propiedades de estos suelos. Para este estudio se recogieron un total de 80 muestras de suelo perturbado de la parte oriental de la ciudad de Addis Abeba. Actividades de construcción Mucho se llevan a cabo en el área de estudio y los problemas debido a suelos expansivos se reportan con frecuencia. Muestreo aleatorio estratificado se utilizó para obtener las muestras necesarias, y las muestras de suelo perturbado fueron tomados de cada punto de muestreo a través mano barrenada y la excavación. Medimos parámetros específicos expansivos de ingeniería de suelos a saber; Límites de Attenberg (límite líquido, límites de plástico y los índices de plasticidad), hinchamiento libre y la capacidad de intercambio catiónico en un laboratorio de mecánica de suelos. También adquirimos los espectros de reflectancia de cada muestra de suelo usando el espectrómetro FieldSpec ASD que cubre la región de longitud de onda 350nm a 2500nm del espectro electromagnético para establecer una relación entre los parámetros de ingeniería y los espectros de reflectancia del suelo. El análisis de los parámetros de ingeniería, así como las características espectrales de las muestras de suelo se ha puesto de manifiesto que las muestras de suelo tienen una gran variación en su potencial de expansión. Enlaces estadísticos se establecieron entre los



parámetros de ingeniería de suelos expansivos y parámetros de características de absorción en regiones específicas de longitud de onda (~1400nm, ~1900nm y ~2200nm). Un método de calibración multivariable se utilizó la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLSR) análisis para la construcción de modelos de predicción empíricos que permitan a la estimación de los parámetros de ingeniería de suelos expansivos de parámetros de características de absorción calculados a partir de esas regiones específicas de longitud de onda. Los coeficientes de correlación (r) obtenidos mostraron que una gran parte de la variación de los parámetros de ingeniería podrían ser explicadas por los parámetros espectrales ($r = 0,85, 0,86, 0,68, 0,83$ y $0,64$) para la CCA, LL, PL, PI y FS, respectivamente). Aparte de los coeficientes de correlación altos, raíz pequeña significa errores cuadrados de calibración (RMSEC) y la predicción (RMSEP), error estándar de calibración (SEC) y la predicción (SEP) y el sesgo mínimo se obtuvieron indicando el potencial de la espectroscopia en la obtención de parámetros de ingeniería de suelos expansivos de sus respectivos espectros de reflectancia, y por lo tanto su potencial aplicabilidad en el apoyo a los geotécnicos investigaciones de dichos suelos. Los resultados indican que la espectroscopia puede ser utilizada para identificar y posteriormente caracterizar suelos expansivos.

- d) (Microzonificaciones sísmicas en ciudades del mundo y discusión sobre la aplicabilidad en la ciudad de Santiago; Errázuriz Blau, 2012) La ciudad de Tesalónica, al norte de Grecia, se ubica cerca un área sísmicamente activa y ha experimentado varios sismos destructivos durante el siglo XX. Esta ciudad se encuentra en un golfo, con una topografía que parte desde el nivel del mar, llegando con un relieve suave a los 100 a 150



m. Su geología se caracteriza por tener una gran variedad de formaciones y suelos. El área urbana se sitúa sobre tres principales estructuras geológicas de gran escala. La primera, un estrato metamórfico sobre roca cristalina que alcanza los 100 a 150 m de profundidad en el área de la costa; la segunda, depósitos aluviales y la tercera, depósitos recientes de arcillas y arenas del holoceno. La metodología desarrollada pretendió lograr una detallada caracterización geotécnica, con énfasis en las propiedades dinámicas que permitieron modelar la respuesta sísmica de los sitios. Estas propiedades son principalmente el espesor, la rigidez y las características de degradación dinámica de los materiales que componen el depósito de suelo. Se consideró para el estudio realizar una amplia recolección, organización y evaluación de la información geotécnica de la ciudad, a partir de proyectos de oficinas públicas y privadas. La organización de información tuvo el objetivo de generar un modelo geotécnico 3D de la ciudad, donde se observó una gran variedad de suelos cuyas características variaban conforme al sitio y a la profundidad, lográndose clasificar a grandes rasgos más de 60 categorías de suelo dentro de 7 formaciones principales. Para cada formación principal, se proporciona la clasificación de suelos, rangos de características granulométricas, índices de plasticidad, índice de vacíos, humedad, de peso unitario y de propiedades de resistencia como número de golpes SPT y compresión no confinada. El resultado de esta microzonificación es una caracterización geotécnica-dinámica de la ciudad en que se distinguen tanto zonas en planta como en profundidad. De este modo, el presente estudio constituye un decisivo avance hacia una microzonificación sísmica, ya que al tener un modelo 3D del subsuelo y con características dinámicas provenientes de ensayos de laboratorio y terreno, se puede



aspirar a realizar detallados estudios de respuesta sísmica tanto 1D como 2 y 3D, siendo alimentado por señales determinadas de un estudio de peligro sísmico.

Se ha encontrado diferentes artículos donde se realizan estudios de caracterización y microzonificación dentro de los últimos años, estos artículos fueron tomados después del 2000. A continuación, se compartirá los estudios realizados en diferentes ciudades del mundo, en los cuales han ocurrido sismos que han afectado las infraestructuras además de las especificaciones en cada uno de los estudios, dando como resultado información para prevenir los problemas con los sismos:

- a) Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. Salgado, M. Bernal, G. Yamín, L. Cardona, O. Fuente: Revista de Ingeniería. jul2010, Issue 32, p28-37. 10p. 14 Graphs, 8 Maps. La disponibilidad de modelos y técnicas de cálculo más refinadas para la evaluación de la amenaza sísmica, así como la existencia de una mayor cantidad de registros de eventos sísmicos, permiten realizar una actualización de los estudios de amenaza sísmica a nivel nacional. Este artículo describe la nueva metodología utilizada para estimar diferentes intensidades sísmicas esperadas para diseño y construcción de edificaciones sismorresistentes en el territorio colombiano. Se presentan los resultados de intensidad obtenidos para diferentes períodos de retorno y ordenadas espectrales para edificaciones de diferentes períodos estructurales, los cuales, además de servir para establecer los valores de diseño en las nuevas Normas NSR-10, también son un insumo



necesario para la realización de estudios de microzonificación y de riesgo sísmico dentro del territorio nacional de la República de Colombia.

- b) Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. Idioma: spanish autores: mora, Mauricio Alexander Villalba, Jesús Daniel Maldonado, esperanza fuente: revista ingenierías universidad de Medellín. 2006, vol. 5 issue 9, p59-74. 16p. El presente trabajo está dirigido a la comparación de las metodologías de análisis sísmico: dinámico cronológico no lineal, pushover tradicional, y dos procedimientos modales. La comparación se realizó a partir del estudio de un edificio de mediana altura, aporricado, de concreto reforzado, representativo de las edificaciones típicamente construidas en Bucaramanga. La estructura fue sometida a uno de los sismos definidos por el estudio de microzonificación de la ciudad, escalado a diferentes valores de aceleración pico efectivo. Los resultados obtenidos fueron comparados en términos de desplazamientos y derivas, con lo cual se pudieron detectar algunas deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías utilizadas, concluyendo que las metodologías modales son una buena aproximación para la determinación del comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado.
- c) El territorio de Cuba forma parte de la región del Caribe, una de las más controvertidas regiones del mundo, dada su compleja situación geodinámica. La posición del territorio de Cuba con respecto a las placas de Norteamérica y el Caribe, determina la presencia de dos provincias sismotectónicas bien definidas. Microzonificación sísmica y su utilización en la reducción del riesgo sísmico en cuba (bertha e. González raynal; centro



nacional de investigaciones sismológicas, departamento de ciudad de la habana; calle 212 no. 2906 e/29 y 31, la coronela, lisa. Ciudad de la habana) presenta unos resultados de los trabajos de precisión del peligro realizados por González y Kogan (1987) y Álvarez (1988), se obtuvo, para la ciudad de Santiago de Cuba, valor $I=VIII$ grados en la escala MSK como efecto sísmico básico. El periodo medio de recurrencia de esta intensidad oscila entre 60-80 años. El último sismo con características similares, ocurrió el 3 de Febrero de 1932. El epicentro de dicho sismo, se localizó en las acuatorias, al Sur de la ciudad. Las sacudidas que produjo el mismo, afectaron severamente a más del 70% de las edificaciones. El análisis detallado de los reportes de las edificaciones dañadas y su correlación con los tipos de suelos, donde estaban ubicadas las mismas, muestra claramente la estrecha correlación existente entre las afectaciones y las condiciones geológicas locales. Para la obtención del primer mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba, González, B. E. y otros, 1986, 1989, realizaron el análisis detallado de la geología superficial y de las características ingeniero-geológicas e hidrogeológicas de los suelos, sobre la base de cientos de calas con profundidades entre 10 y 50 metros. Los suelos se clasificaron en tres tipos básicos: rocosos, semirosos y friables y en función de las variaciones de la intensidad sísmica, determinadas mediante el método de las Analogías Ingeniero-Geológicas, en cuatro categorías: 1) no aptos para la construcción; 2) poco favorables para la construcción; 3) medios y 4) favorables.



1.2. MARCO TEORICO

1.2.1. TERREMOTO

Un terremoto es el movimiento brusco de la Tierra, causado por la liberación de energía acumulada durante un largo tiempo. La corteza de la Tierra está conformada por una docena de placas de aproximadamente 70 km de grosor las cuales se están acomodando en un proceso que lleva millones de años. Estas placas comienzan a desplazarse sobre o bajo la otra originando lentos cambios en la topografía. Pero si el desplazamiento es dificultado comienza a acumularse una energía de tensión que en algún momento se liberará y una de las placas se moverá contra la otra rompiéndola y liberándose entonces una cantidad variable de energía que origina el Terremoto⁷.

1.2.1.1. Magnitud e intensidad sísmicas

El efecto devastador de un terremoto depende de un conjunto de factores: Su magnitud, su profundidad, la distancia a centros poblados, el tipo de terreno, el tipo de construcciones (no sólo viviendas, sino también caminos, vías férreas, conductos, embalses, etc.), la duración, la cantidad de réplicas, es decir movimientos de menor magnitud que suceden al principal.

Magnitud: es una medida cuantitativa de la energía liberada en forma de ondas sísmicas. Es un parámetro de origen de un sismo. Se mide en una escala continúa.

⁷ (Ortiz Moscoso)



Intensidad: es una medida cualitativa de los efectos en un lugar determinado debido a un sismo. En América se utiliza la escala MM. Hay dos escalas famosas, la de Richter y la de Mercalli.

La escala de Richter, establecida en 1935, apunta a medir la cantidad de energía liberada. No crece de una manera lineal: un grado más puede significar una liberación de energía quince veces mayor que el anterior, por ejemplo. Y tampoco es una escala “cerrada”, no hay un tope establecido. Podría haber un terremoto que excediera el punto máximo de la escala, generando un nuevo nivel. .

Otro enfoque tiene la popular escala que creó el italiano Giuseppe Mercalli en 1902, y que fue modificada por otros sismólogos en 1931. No se basa en los registros sismográficos sino en los efectos del terremoto: daños en las estructuras y sensaciones percibidas por las personas. Tiene una docena de niveles, expresados en números romanos, que van desde el nivel I, “Sacudida sentida por muy pocas personas” hasta el XII “Destrucción total, ondas visibles sobre el terreno, perturbación en las cotas de nivel de ríos, lagos y mares, objetos lanzados por el aire hacia arriba”.

RICHTER MIDE LA MAGNITUD = Causa

MERCALLI MIDE LA INTENSIDAD = Efecto⁸

⁸ (Trujillo P., Ospina Lopez, & Parra Lara, 2010)



Tabla 1. Escala abierta de Richter

| Magnitud en escala Richter | Efectos del terremoto |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Menos de 3.5 | Generalmente no se siente, pero es registrado |
| 3.5 - 5.4 | A menudo se siente, pero sólo causa daños menores. |
| 5.5 - 6.0 | Ocasiona daños ligeros a edificios. |
| 6.1 - 6.9 | Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas. |
| 7.0 - 7.9 | Terremoto mayor. Causa graves daños. |
| 8 o mayor | Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas. |

Fuente: (Los terremotos: Una amenaza natural latente, 2010)

Tabla 2. Escala de Mercalli

| Grado | Descripción |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I. Muy débil | Imperceptible para la mayoría excepto en condiciones favorables. Aceleración menor a 0.5 Gal. |
| II. Débil | Perceptible sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios. Los objetos colgantes suelen oscilar. Aceleración entre 0.5 y 2.5 Gal. |
| III. Leve | Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Muchos no lo reconocen como terremoto. Los automóviles detenidos se mueven ligeramente. Sensación semejante al paso de un camión pequeño. Aceleración entre 2.5 y 6.0 Gal. |
| IV. Moderado | Perceptible por la mayoría de personas dentro de los edificios, por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche algunas personas pueden despertarse. Perturbación en cerámica, puertas y ventanas. Las paredes suelen hacer ruido. Los automóviles detenidos se mueven con más energía. Sensación semejante al paso de un camión grande. Aceleración entre 6.0 y 10 Gal. |
| V. Poco Fuerte | La mayoría de los objetos se caen, caminar es dificultoso, las ventanas suelen hacer ruido. Aceleración entre 10 y 20 Gal. |
| VI. Fuerte | Lo perciben todas las personas, muchas personas asustadas suelen correr al exterior, paso insostenible. Ventanas, platos y cristalería dañadas. Los objetos se caen de sus lugares, muebles movidos o caídos. Revoque dañado. Daños leves a estructuras. Aceleración entre 20 y 35 Gal. |
| VII. Muy fuerte | Pararse es dificultoso. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas. Mampostería dañada. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Aceleración entre 35 y 60 Gal. |
| VIII. Destructivo | Daños leves en estructuras especializadas. Daños considerables en estructuras ordinarias bien construidas, posibles colapsos. Daño severo en estructuras pobremente construidas. Mampostería seriamente dañada o destruida. Muebles completamente sacados de lugar. Aceleración entre 60 y 100 Gal. |
| IX. Ruinoso | Pánico generalizado. Daños considerables en estructuras especializadas, paredes fuera de plomo. Grandes daños en importantes edificios, con colapsos parciales. Edificios desplazados fuera de las bases. Aceleración entre 100 y 250 Gal. |
| X. Desastroso | Algunas estructuras de madera bien construida destruidas. La mayoría de las estructuras de mampostería y el marco destruido con sus bases. Rieles doblados. Aceleración entre 250 y 500 Gal. |
| XI. Muy desastroso | Pocas, si las hubiera, estructuras de mampostería permanecen en pie. Puentes destruidos. Rieles curvados en gran medida. Aceleración mayor a 500 Gal. |
| XII. Catastrófico | Destrucción total con pocos sobrevivientes. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionadas. |

Fuente: (Mendibure & Narvaez, 2012)



1.2.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

1.2.2.1. Textura del suelo

La textura de un suelo está determinada por las cantidades de partículas minerales inorgánicas (medidas como porcentajes en peso) de diferentes tamaños (arena, limo y arcilla) que contiene. La proporción y magnitud de muchas reacciones físicas, químicas y biológicas en los suelos están gobernadas por la textura, debido a que ésta determina el tamaño de la superficie sobre la cual ocurren las reacciones, además de la plasticidad, la permeabilidad, la facilidad para trabajar la tierra, la sequedad, la fertilidad y la productividad que varían dependiendo de la región geográfica. Las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande (0.05-2mm) y, por lo tanto, exponen una superficie pequeña comparada con la expuesta por un peso igual de partículas de arcilla o de limo. La función que ésta tiene en las actividades físicas y químicas de un suelo es casi insignificante, las arenas aumentan el tamaño de los espacios de los poros entre las partículas, facilitando el movimiento del aire y del agua de drenaje. El tamaño de partícula de los limos va de 0.002 a 0.05mm, tiene una velocidad de intemperización más rápida y una liberación de nutrientes solubles para el crecimiento vegetal mayor que la arena. Los suelos limosos tienen gran capacidad para retener agua disponible para el crecimiento vegetal. Las partículas de limo se sienten suaves, semejantes a un polvo y tienen poca tendencia a reunirse o a adherirse a otras partículas (Buckman y Brady, 1966). El tamaño de partícula de los suelos arcillosos es menor a 0.002mm; tienen la capacidad de retener agua contra la fuerza de gravedad. La fracción de arcilla, en la mayoría de los suelos, está compuesta de minerales que difieren



grandemente en composición y propiedades en comparación con la arena y el limo. El componente arcilloso de un suelo es fundamental para determinar muchas características de éste, debido a que las partículas de arcilla tienen un área superficial Licenciada en Biología: Hilda Edith Huerta Cantera 8 mayor. Cada partícula de arcilla tiene cargas eléctricas negativas en su superficie externa que atraen y retienen cationes de manera reversible. Muchos cationes como potasio (K+) y magnesio (Mg), son esenciales para el crecimiento vegetal y son retenidos en el suelo por las partículas de arcilla⁹.

Tabla 3. Textura y características del suelo

| Nombre Suelo | Gravas y Arenas | Limos | Arcillas |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Tamaño Grano | Grano Grueso, se puede distinguir los granos individuales con el ojo | Grano fino, no se puede identificar los granos con el ojo | Grano fino, no se puede identificar los granos con el ojo |
| Características | Granular, sin cohesión | Poca Cohesión, Poco Plásticos | Cohesivos, Plásticos |
| Efecto del agua | Poco importante | Importante | Muy importante |
| Efecto de distribución de tamaño | Importante | No es importante | No es importante |

Fuente: (Mecánica de suelos; Covo Torres , 2008)

1.2.2. LICUEFACCIÓN DE SUELO

Entre los riesgos geológicos se encuentra la licuefacción del suelo, un fenómeno que consiste en la pérdida de consistencia del terreno y de la fuerza que este tiene para soportar grandes cargas, es decir que el suelo se convierte en algo así como unas arenas movedizas en las que los edificios se pueden llegar a hundir más de un metro. Este proceso tiene lugar en terrenos

⁹ (Huerta Cantera , 2010)



arenosos o limosos con un tamaño de grano que apenas tiene variación y que se encuentran saturados de agua. La capa afectada, además, se encuentra por lo general a menos de 10 metros de profundidad.

1.2.2.1. Zonas en las que se puede producir licuefacción del terreno

Cabe destacar que los rellenos arenosos que se crean en muchos lugares, ya sea para ganar terreno de construcción u otras causas, son susceptibles de verse afectados. Otras zonas en las que se puede generar licuefacción pueden ser las áreas próximas a ríos, estuarios y costas.

1.2.2.2. Cómo se origina la licuefacción del suelo por un terremoto

Así, para que se origine una licuefacción del suelo, este tiene que verse sometido a algún tipo de estrés o movimiento rápido, tal como pueden ser las ondas sísmicas. Estas provocan un cizallamiento del terreno que deforma su estructura y provoca que los huecos entre las partículas, rellenos con agua, se cierren más. Esto origina, a su vez, que la presión que ejerce el agua en el suelo aumente y la resistencia a movimientos de cizalla disminuya hasta el punto de que si el terreno no es capaz de sostener las edificaciones que se han levantado sobre él, este ceda y provoque daños de diversa intensidad en carreteras, puentes o edificios. De esta forma, este fenómeno tiene como consecuencia que un suelo con características de sólido pase a tener características viscosas o semilíquidas, como se ve en la ilustración 1.



Ilustración 1. Licuefacción por el terremoto de Japón en 2011 – CC. **Fuente:** foto tomada por Scott Ashford, courtesy of Oregon State University <https://www.flickr.com/photos/oregonstateuniversity/5619603229/in/photostream/>

1.2.2.3. Efectos de la licuefacción originada por un gran terremoto

En ocasiones puede ocurrir que el agua o el lodo se filtren hacia arriba y salga a la superficie por medio de grietas y se creen auténticos volcanes de lodo después de la ocurrencia de un gran terremoto. Los efectos de la licuefacción tras un fuerte seísmo pueden ser dramáticos, ya que el fenómeno desestabiliza las construcciones pudiendo generar su caída. En la ilustración 2, podemos observar que efectos produjo la licuefacción después de un sismo en Japón.



Ilustración 2. Efectos de licuefacción tras un sismo en Japón en 1964. **Fuente:** Dominio Público (Wikipedia)

También puede ocasionar daños en tuberías, cables eléctricos y conexiones de gas cuando el edificio afectado se hunde mientras el terreno circundante no lo hace. Y si la zona afectada por licuefacción tiene cierta pendiente el terreno puede llegar a deslizarse originando un movimiento lateral del suelo que puede llegar a unos pocos metros¹⁰.

1.2.2.4. Método general de análisis.

Hay que destacar, dos enfoques importantes para evaluar el potencial de licuefacción de suelos granulares sujeto a movimientos sísmicos, planteamiento corroborado por Seed (1979):

- **Métodos empíricos:** Basado en observaciones in situ del comportamiento de depósitos tipo arena durante movimientos sísmicos anteriores y correlaciones entre predios que no se han licuado, y densidad Relativa del número de golpes de ensayos SPT.

¹⁰ (Licuefacción, una consecuencia más de los grandes terremotos, 2013)

- **Métodos analíticos:** Basados en la determinación en laboratorio de las características de resistencia a la licuefacción de muestras no alteradas y el uso de análisis de respuestas dinámica del predio para determinar la magnitud de las tensiones de corte inducidas por los movimientos sísmicos.

No obstante, ambas metodologías solicitan definir el nivel de aceleración del terreno como prerequisite para evaluar el potencial de licuefacción. A menudo este nivel se establece a partir de relaciones entre la magnitud del sismo, la distancia al epicentro y la aceleración pico.¹¹

Las correlaciones más conocidas entre potencial de licuación y pruebas in-situ están basadas en el ensayo de penetración estándar. En la figura 3, se presenta la relación típica entre los esfuerzos inducidos y los esfuerzos críticos en función de la profundidad. La zona más susceptible de sufrir licuación se localiza entre unos 2 y 15 m de profundidad, pero estos límites deben calcularse de acuerdo con procedimientos como el que se indica posteriormente.

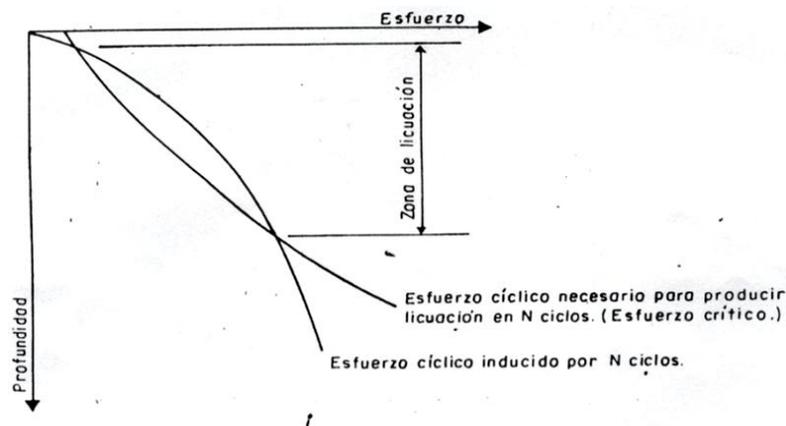


Ilustración 3. Relación típica entre esfuerzos inducidos y esfuerzos críticos. **Fuente:** (Dr. Obando, 2009)

¹¹ (Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas., 2009)



Técnicas Empíricas: Entre ellas, uno de mayor difusión y aplicación, el Procedimiento Simplificado, en que se calculan dos variables sísmicas primarias tales como: a) la excitación sísmica de la capa de suelo, expresada en términos de la relación de esfuerzos cíclicos promedios ($CSR = \tau_{prom} / s'v_o$); y b) la capacidad de la capa de suelo para resistir la licuación, en términos de la relación de resistencia a la licuefacción. En la mayoría de las técnicas empíricas, el valor promedio de la relación de esfuerzos cortantes cíclicos (CSR) inducidos por el sismo se obtiene de los análisis de la respuesta dinámica del subsuelo.

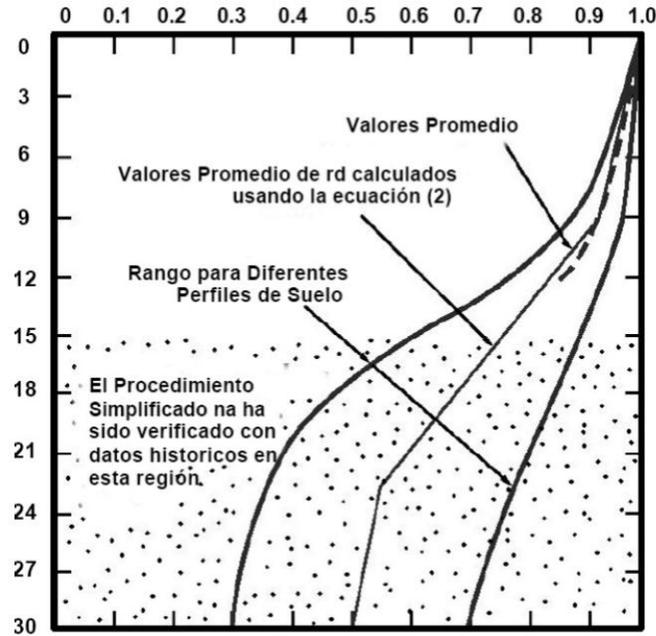
$$\frac{\tau_{prom}}{\sigma v'} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma v}{\sigma v'} r_d$$

Ecuación (1) Relación de esfuerzos cortantes cíclicos

Dónde: a_{max} es la máxima aceleración que se espera en el lugar según las leyes de atenuación, amplificada por el efecto de sitio, considerando que los suelos no se licúan y que las presiones de poros no se incrementan en el proceso; g es la aceleración de la gravedad; σv_o y $s'v_o$ son los esfuerzos verticales total y efectivo; y r_d es el factor de reducción de esfuerzos, el cual varía ampliamente con la profundidad dependiendo del perfil de suelos tal como sigue:

$$r_d = \begin{bmatrix} 1 - 0.00765z & z \leq 9.2 \text{ m} \\ 1.174 - 0.0267z & 9.2 < z \leq 23 \text{ m} \\ 0.744 - 0.008z & 23 < z \leq 9.2 \text{ m} \\ 0.50 & z > 30.0 \text{ m} \end{bmatrix}$$

Ilustración 4. Factor r_d vs profundidad



Fuente: (Dr. Obando, 2009)

Dadas las dificultades para obtener muestras inalteradas de los depósitos de suelos licuables, en la práctica se usan procedimientos in situ para evaluar la capacidad de los suelos arenosos para resistir la licuación: a) penetración estándar (SPT); b) penetración con cono (CPT); c) velocidad de ondas de corte (v_s); y c) penetración Becker en gravas (BPT). Para asegurar una adecuada definición de la estratigrafía y una evaluación consistente de la resistencia a la licuación, en cada sitio se debe llevar a cabo dos o más de los procedimientos indicados. Por varias ventajas, los procedimientos que más se llevan a cabo son el SPT y algunas veces las mediciones de V_s . Para determinar la resistencia a la licuación de los suelos arenosos, la relación CSR se compara con la relación CRR. Esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos demandados para causar licuación y los valores de N (SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1)_{60}$).

Para determinar la resistencia a la licuación de los suelos arenosos, la relación CSR se compara con la relación CRR. Esta última se obtiene de correlaciones empíricas entre la relación de esfuerzos cíclicos requeridos para causar licuación y los valores de N (SPT) normalizados por profundidad y energía de los golpes del martillo (valores de $(N_1)_{60}$).

En la Figura 6 se muestran las modificaciones que Youd e Idriss (1997) recomiendan para las curvas empíricas propuestas por Seed y otros (1985) para calcular la relación CRR, para valores bajos de $(N_1)_{60}$, en un sismo de magnitud de momento $M_w = 7.5$.¹²

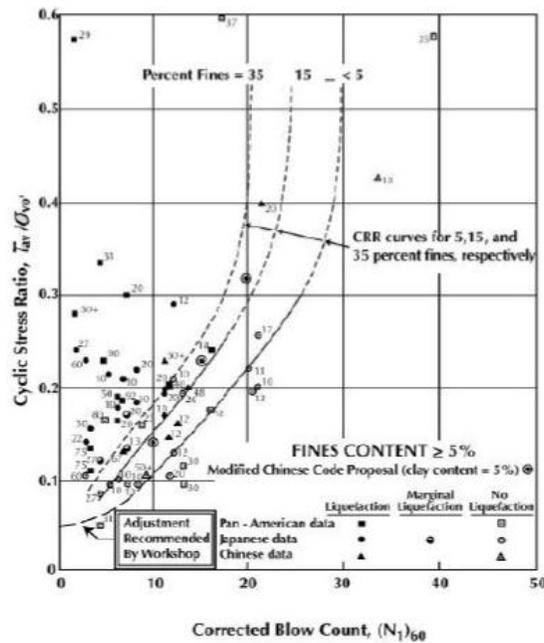


Ilustración 5. Curvas de la relación CRR para diferentes contenidos de finos y $M_w = 7.5$. **Fuente:** (Dr. Obando, 2009)

¹² (Dr. Obando, 2009)



1.2.2.5. Evaluación del potencial de licuación a partir de ensayos de penetración estándar (SPT).

El SPT es tal vez la prueba de campo más ampliamente utilizada para estudios de suelos en todo el mundo. Sus resultados se han correlacionado con ocurrencia de licuación y actualmente existe una abundante base de datos que permite definir las fronteras entre licuación y no licuación, en función del tipo de suelo, de la magnitud del sismo y de la aceleración máxima esperada en superficie.

Para obtener los puntos que permiten definir tales fronteras, ha sido necesario disponer tanto de ensayos de penetración estándar, como de registros sísmicos (magnitud y aceleración) y observar sí en los sitios estudiados se presentó o no licuación. Los puntos rellenos en la figura 6, corresponden a sitios que presentaron licuación después de un sismo de magnitud 7.5, mientras que los puntos blancos representan sitios que no sufrieron licuación. En la figura 7, se presentan fronteras similares que se han definido para sismos de diferentes magnitudes.

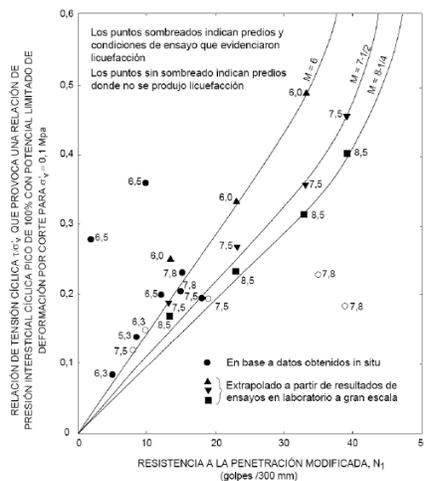


Ilustración 6. Correlación entre el comportamiento de licuefacción y la resistencia a la penetración. **Fuente:** (Dr. Obando, 2009)

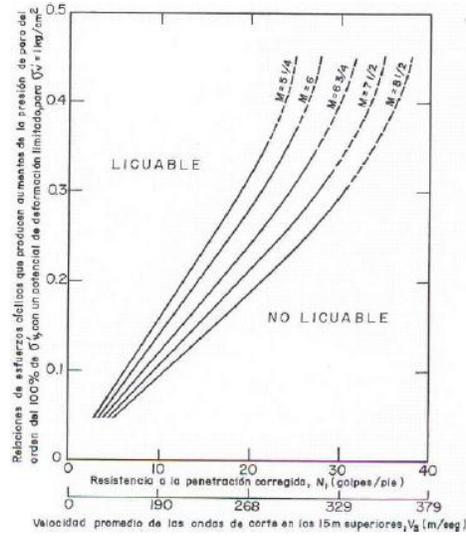


Ilustración 7. Fronteras de licuación para sismos de diferente magnitud. **Fuente:** imagen tomada de Henríquez, C. (2007)

1.2.3. ONDAS ELÁSTICAS EN DEPÓSITOS DE SUELOS

Las pruebas geofísicas se basan en el registro de la propagación de ondas elásticas generadas por pequeñas perturbaciones mecánicas, tales como el efecto de la caída libre de una masa, a través de depósitos de suelo sin alterar las propiedades geotécnicas naturales de los materiales investigados.

1.2.3.1. Tipos de Ondas Elásticas

Las ondas elásticas se dividen en dos grandes grupos, las de cuerpo, que viajan en el interior del medio elástico, y las de superficie, que se propagan a lo largo de la frontera de un medio semi-infinito, como es la superficie de un depósito de suelos. Las ondas de cuerpo se subdividen a su vez en ondas de compresión o primarias (V_p) y de corte o secundarias (V_s)

(Ilustración 8). Las ondas V_p viajan a una velocidad entre 70% y 140% mayor que las V_s , para valores de la relación de Poisson (μ) de entre 0.25 y 0.4, rango característico en suelos y rocas.

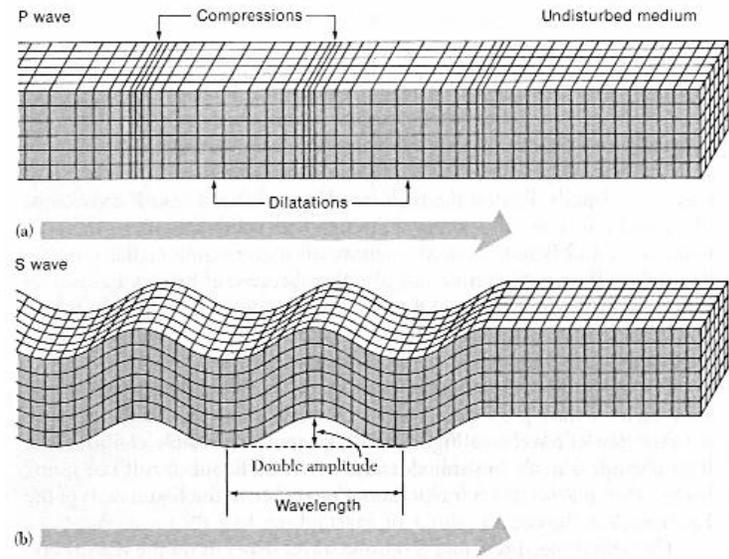


Ilustración 8. Onda de cuerpo que se dividen en primarias o de compresión (V_p) y secundarias o de cortes (V_s).

Fuente: Lazcano 2007

Por lo que respecta a ondas de superficie, hay varios tipos, siendo la más importante en geotecnia las ondas Rayleigh, cuya velocidad (V_R) es de alrededor de 93% de la velocidad de las ondas de corte (V_s).

La velocidad de onda de compresión (V_p) se determina usualmente con la prueba de refracción sísmica y la velocidad de onda de corte (V_s) con las pruebas down hole y cross hole, o a partir de datos de dispersión de ondas superficiales.

Velocidad de Onda de Corte (V_s): La determinación de la velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s) es de gran utilidad en la geotecnia, ya que con este valor se puede:



- 1) Determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (G).
- 2) Inferir densidad en campo.
- 3) Estimar el estado de esfuerzos.
- 4) Estimar la cementación natural.
- 5) Evaluar la alteración de una muestra (Stokoe et al., 1989).

La relación entre V_s y el módulo de corte (G) está dada por la ecuación:

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

Ecuación (2) Módulo de rigidez

En donde:

ρ = densidad del material

V_s = velocidad de onda de corte

Dado que las deformaciones causadas por las pruebas geofísicas son muy pequeñas, el módulo cortante calculado con valores de V_s obtenido de dichas pruebas corresponde al valor máximo (G_0), el cual sufre una degradación dependiente de las características geotécnicas del suelo y de la deformación inducida. Este tipo de comportamiento se conoce como elástico no-lineal y está asociado con la variación de las propiedades mecánicas de suelos y rocas blandas ante sollicitaciones sucesivas de carga y descarga.



1.2.3.2. Ondas de superficie

Como ya se mencionó, cuando se golpea la superficie de un depósito de suelos, se generan ondas elásticas tanto de cuerpo (compresión y corte) como de superficie (Love y principalmente tipo Rayleigh). El 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, el 27% como ondas de corte y cerca del 7% como ondas de compresión.

Lo anterior era conocido desde los años 60, aunque la tecnología para monitorear las ondas de superficie solo apareció hasta principios de la década de los 80s. De acuerdo con lo anterior, durante muchos años los métodos geofísicos sísmicos estuvieron enfocados únicamente al registro y análisis de ondas de compresión y corte, mientras las de superficie se consideraban como “ruido” que debía ser filtrado.

Las ondas Rayleigh en un medio sólido homogéneo se pueden visualizar como las ondas en la superficie de un estanque de agua; el movimiento de partícula forma una elipse vertical, paralela a la dirección de propagación (a lo largo de la superficie) y con dirección retrógrada hasta cierta profundidad en que se vuelve prógrada (Ilustración 10).

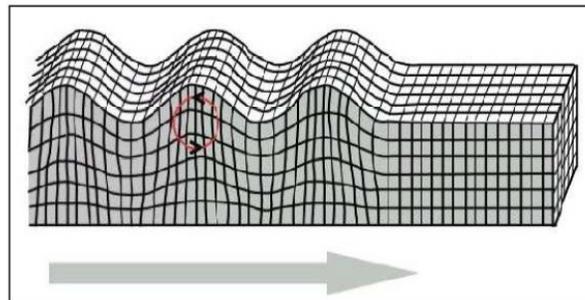


Ilustración 9. Propagación de ondas de superficie tipo Rayleigh. **Fuente:** Lazcano 2007

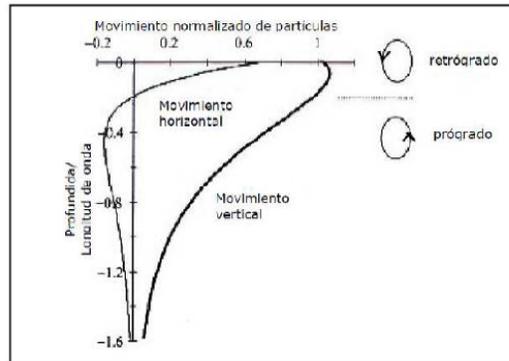


Ilustración 10. Onda Rayleigh y movimiento de partículas. **Fuente:** Lazcano 2007

En un depósito de suelos perfectamente homogéneo, la onda Rayleigh viajará a una velocidad que es independiente de su longitud de onda. Sin embargo, si en el suelo hay estratos con rigideces, densidades o relaciones de Poisson variables, entonces la velocidad de la onda de Rayleigh dependerá de su longitud de onda.

Cuando la velocidad de los componentes de onda depende de la frecuencia, se dice que la onda es dispersiva. Este comportamiento que exhiben las ondas Rayleigh en materiales no uniformes es el principio en el que se fundamentan los diferentes métodos de análisis de onda de superficie (Matthews et al., 1996)¹³.

¹³ (Aponte González, 2011)



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar geotécnicamente el subsuelo del sector Getsemaní teniendo en cuenta el comportamiento dinámico con el fin de adoptar las medidas correctivas y preventivas que permitan reducir la vulnerabilidad de las edificaciones y obras de infraestructura durante sismos de gran intensidad a partir de la recopilación de información.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer una caracterización geotécnica del subsuelo de Cartagena en el sector de Getsemaní con base en la recopilación de estudios geotécnicos realizados en la zona.
- Elaborar un modelo geológico-geotécnico de la zona mediante la recopilación de datos topográficos, geológicos, geotécnicos.
- Evaluar el potencial de licuación con respecto a estudios ya realizados en la zona.
- Evaluar el comportamiento sísmico teniendo en cuenta el potencial de licuación y los modelos geológico-geotécnicos de la zona de estudio.
- Plantear soluciones y recomendaciones conceptuales para reducir la vulnerabilidad ante el comportamiento sísmico de la infraestructura de la zona.



3. ALCANCE

3.1. DELIMITACION ESPACIAL

Colombia es un país ubicado en la zona noroccidental de América del Sur, su extensión territorial es de 1.141.748 km² y es el único país del continente suramericano que tiene costas en el Océano Pacífico y el Océano Atlántico.

Cartagena de Indias es una ciudad dentro de Colombia a orillas del Mar Caribe y es actualmente la capital del departamento de Bolívar. La misma cuenta con 890.000 habitantes de los cuales 850.000 habitan en el área urbana (censo2006)¹⁴.

Sus coordenadas son 10° 26' Latitud Norte - 75° 33' Longitud Oeste.

Ilustración 11. Localización de Cartagena de indias



Fuente: imagen tomada de Google Maps

¹⁴ (Los mejores destinos, s.f.)



Getsemaní es uno de los barrios más representativos de la ciudad, dado que allí se dio el Grito de Independencia en 1811. Getsemaní es conocido por recibir gran cantidad de mochileros, por sus tiendas de oficios (modistas, zapateros) y por su Parque Centenario. Era el barrio donde habitaban los esclavos en la época de la Colonia. Getsemaní se ubica cerca del Centro y pegado a la Ciudad Amurallada¹⁵.

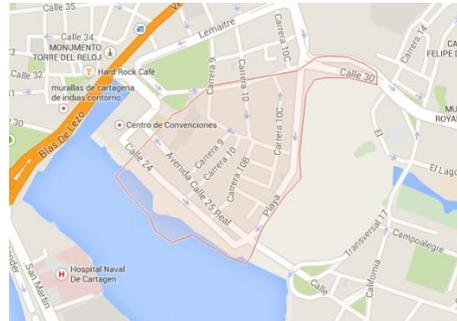


Ilustración 12 localización del área de estudio. **Fuente:** imagen tomada por Google maps.

El sector de Getsemaní se encuentra al lado del centro histórico, a pesar de esto se encuentran una mínima cantidad de murallas en esté. Ubicado en la Unidad Comunera 1, posee varias salidas vehiculares entre ellas el Puente Román que lo comunica con el barrio de Manga, por otra parte también limita con la zona del centro de convenciones, las calles 8b, 9 y 10 conocida como la media luna, además con la calle 10c o playa pedregosa.

3.2. DELIMITACIÓN TEMPORAL

El proyecto se llevó a cabo durante el año 2016 en un tiempo aproximado de 8 meses, iniciando en el mes de febrero y es finalizado a mediados de octubre del mismo año.

¹⁵ (Viajeros.com, s.f.)



3.3. ALCANCE CONCEPTUAL

Para determinar las variables de estudio, principalmente se recogió toda la información posible, se analizó de tal forma que cada persona entienda sobre qué trata el estudio y se ha digitalizado esta información sobre los estudios del subsuelo y los sísmicos. Para zonificar el sector de Getsemaní, realizamos un mapa que se pueda observar la caracterización geotécnica del sector de Getsemaní y de allí realizamos un modelo geológico-geotécnico y un análisis de dicho modelo dando como resultado mapas de isoclasas de licuación y se estableció un comportamiento dinámico del subsuelo a partir de los sismos que se presentaron en la zona teniendo en cuenta siempre el porcentaje de licuación.

De esta forma, se tienen recomendaciones para que los constructores brinden a los habitantes de la zona una seguridad tanto a los que viven como a los que se quedan de paso, sobre todo a los que posiblemente posean problemas en su hogar y tengan que ser movidos porque la estructura no resiste un sismo.

3.4. RESULTADOS

Se espera que los resultados de dicha investigación sean lo más claros posibles para que el sector de Getsemaní posea una caracterización geotécnica y mapas de estudio del subsuelo para prevenir posibles sismos.



3.5. PRODUCTOS

Lo necesario para que esta investigación sirva para futuros proyectos, son los resultados de la misma, ya que estos resultados servirán para realizar una microzonificación sísmica en la ciudad de Cartagena.

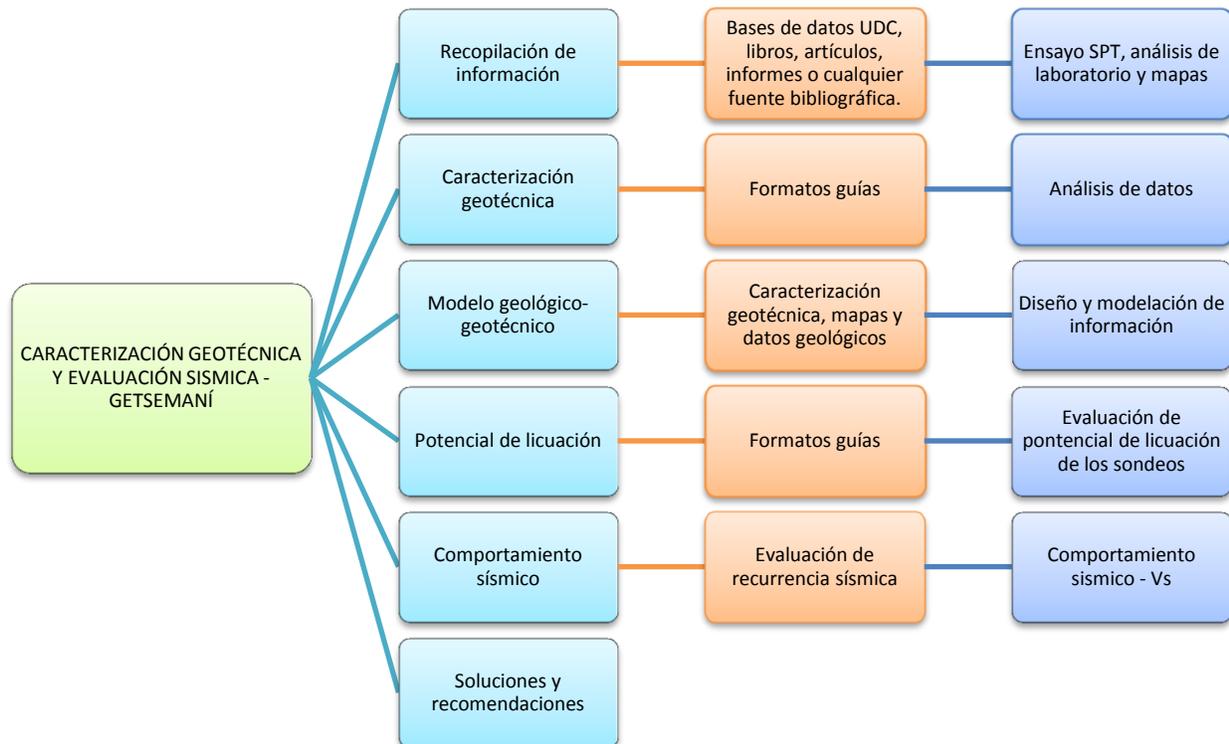
3.6. LIMITACIONES

Esta investigación no cubre un estudio de suelo que permita realizar una microzonificación sísmica porque para ello se necesita de una asociación con entidades públicas y/o privadas que puedan mantener los gastos del estudio completo. Además es un proyecto meramente investigativo.



4. METODOLOGÍA

Esta investigación se planteó para realizar una caracterización geotécnica del subsuelo del sector de Getsemaní teniendo en cuenta el potencial de licuación que se presenta en el sector, se obtuvo toda la información posible de las bases de datos de la universidad de Cartagena, adicional a esto se recopiló estudios, laboratorios, sondeos, etc., de caracterizaciones geotécnicas realizadas en la ciudad, lo más cercano al sitio de estudio, estas fueron proporcionadas por ingenieros civiles de la ciudad. Se recopilaron varios estudios dentro de los cuales tomamos en cuenta 9 de ellos por tener información más completa.





Esta investigación es de tipo bibliográfica ya que recopiló información existente y es ligeramente descriptiva por los datos de cada estudio realizado en la zona.

El diseño experimental de este proyecto tiene en cuenta las variables: suelo, potencial de licuación, caracterización geotécnica y el comportamiento sísmico, por lo tanto los sondeos, las tablas y graficas que han resultado después de ordenar datos e información principal, se han analizado para otorgar soluciones a los problemas del fenómeno de licuación en la zona estudiada.

4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Se recopiló información en libros, artículos, informes o cualquier fuente bibliográfica, sobre caracterizaciones geotécnicas hechas en Colombia o en cualquier parte del mundo, Este punto se realizó, ya que se puede encontrar información de una caracterización geotécnica en cualquier base de datos, ya sea en la plataforma de la universidad de Cartagena como en cualquier parte de la red. Además contamos con el director del trabajo de investigación que nos ha proporcionado su ayuda al momento de reunir toda la información.

Se recogió información sobre el potencial de licuación, el comportamiento sísmico del suelo, y estudios hechos en Colombia y en otros lugares del mundo.



4.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Se recopiló ensayos SPT previamente realizados por ingenieros civiles de la ciudad y otros estudios que nos proporcionó nuestro director de tesis. Posteriormente se organizó la información, y se analizaron los sondeos y sus respectivos estudios de laboratorio para conocer sus características tanto físicas como químicas del suelo donde se realizaron. Se complementó la información con investigaciones sobre el suelo de Getsemaní.

4.3. MODELO GEOLÓGICO–GEOTÉCNICO

Al momento de elaborar el modelo geológico-geotécnico lo dividimos en varias etapas de trabajo. El trabajo de modelización lo comenzamos con la recopilación de aquellos datos topográficos (fotografías aéreas y modelos digitales del terreno), geológicos (mapas estructurales, mapas geomorfológicos, mapas geológicos y mapas de curvas isopacas o espesor de sedimentos), geotécnicos (sondeos mecánicos, ensayos de laboratorio y ensayos in situ) disponibles sobre el sector de estudio¹⁶. Se arregló la topografía a partir de un modelo digital del terreno, constituido en base a la superposición de diferentes aspectos temáticos del sector. Se elaboró una cartografía sedimentológica basado en los datos y el análisis de los sondeos. Se realizó un mapa estructural geomorfológico con fotos aéreas del sector. Asignamos propiedades geotécnicas a las unidades y para ello se contó con los sondeos recopilados que oscilaban entre 0 y 10 m., los datos de los ensayos realizados sobre las muestras de los sondeos fueron tratados estadísticamente. Luego establecimos un modelo geomecánico gracias a la conformación del

¹⁶ (Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3D de la vega baja del río segura (Alicante, se España))



modelo geológico diseñado y las propiedades geotécnicas asignadas a cada unidad. Por último, elaboramos el modelo geotécnico de comportamiento el cual está constituido por el modelo geomecánico y los datos del comportamiento del suelo.

4.4. POTENCIAL DE LICUACIÓN

Para evaluar el potencial de licuación se utilizó la metodología de Kishida y Ohsaki (1969 y 1970), método de Seed et. al (1983). Para esto se tuvo en cuenta el número de golpes del suelo, este dato fue proporcionado por los sondeos anteriormente recopilados mediante el ensayo tipo SPT, con esto se hizo un análisis relacionando el número de golpes con las condiciones del suelo ante sollicitaciones sísmicas, capaces de generar la licuación del terreno¹⁷.

4.5.COMPORTAMIENTO SISMICO

Para el análisis de comportamiento sísmico del suelo del sector de Getsemaní se halló la velocidad de onda de corte del suelo de cada uno de los sondeos, después teniendo como base la velocidad de onda de corte se hallaron parámetros sísmicos importantes, tal como la velocidad de onda de compresión, relación de Poisson, el coeficiente de rigidez de cortante máximo y el módulo elástico dinámico. Posteriormente hallamos el periodo fundamental de vibración del suelo utilizando la velocidad de onda de corte promedio de los sondeos.

¹⁷ (Dr. Obando, 2009)



4.6. VULNERABILIDAD SÍSMICA

Con base en el estudio ya realizado, se plantearon soluciones y recomendaciones conceptuales de posible vulnerabilidad sísmica en la zona de Getsemaní. Primero se evaluaron posibles amenazas teniendo en cuenta los datos de la red sismológica, la caracterización geotecnia del suelo, el potencial de licuación y comportamiento sísmico del suelo, con base en esto evaluamos la vulnerabilidad de dichas zonas, y desarrollamos alternativas de mitigación y recomendaciones conceptuales ante esta vulnerabilidad.



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

5.1.1. RECOPIACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN

Para realizar la caracterización geotécnica del sector de Getsemaní se recopilaron sondeos ejecutados por ingenieros de la ciudad, con su respectivo estudio de laboratorio del sub suelo. Posteriormente se estudió la información de los sondeos y se organizó mediante un formato especial para descripción de suelos, tal como se ve en la ilustración 13. De tal manera que se viera fácilmente la relación entre la profundidad del sondeo, la descripción y la naturaleza del terreno encontrado, y el número de golpes (obtenidos por el ensayo SPT). En este formato se logra apreciar la variación del número de golpes con respecto a la profundidad del sondeo y la naturaleza del estrato.

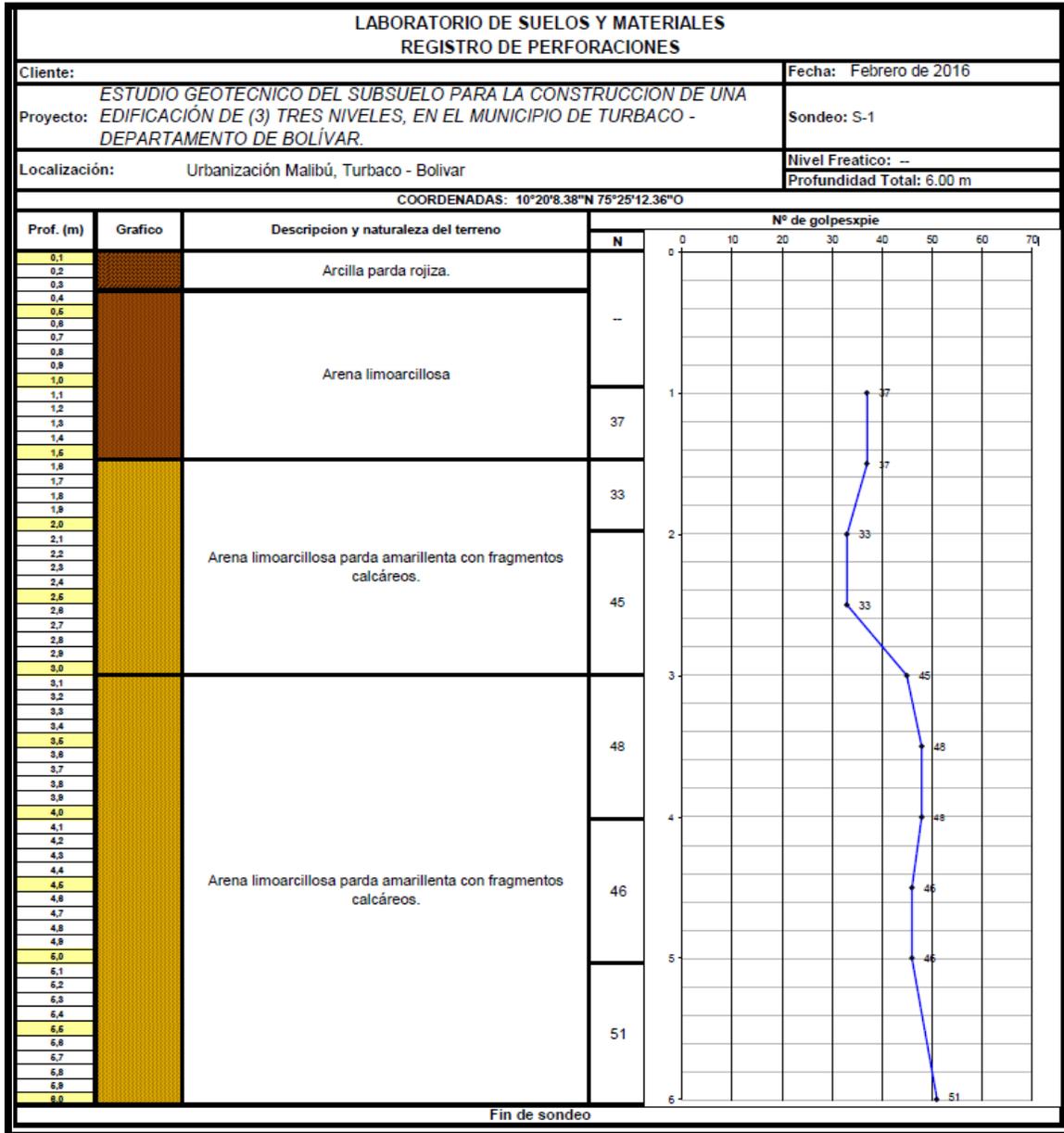


Ilustración 13. Formato guía para descripción de sondeos. Fuente: Ing. Guilliam Barbosa

Luego teniendo en cuenta los estudios de laboratorio de los sondeos, organizamos la información contenida en estos, mediante un formato de registro de perforaciones (Ilustración 13). En este formato se ve de forma organizada las principales características del suelo a determinada profundidad.



| LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------------|-----------------|-------|-------|--------|--------------------------|--------|--------|----------------|------------------|----------------|-------------------------------------------|------------------------|------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| REGISTRO DE PERFORACIONES | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Perforación N° | Muestra N° | Profundidad (m) | | | Wn (%) | Análisis de Consistencia | | | Pasa No. 4 (%) | Pasa No. 200 (%) | G _s | Módulo de Elasticidad (T/m ²) | Cu (T/m ²) | Φ (grados) | No. De Golpes/pie | S.U.C.S. | Descripción del Suelo | γ _t (Ton/m ³) | γ _d (Ton/m ³) |
| | | | | | | LL (%) | LP (%) | IP (%) | | | | | | | | | | | |
| Sondeo-1 | 2 | 0,50 | 1,50 | 17,20 | 39 | 23 | 16 | 100,00 | 79,30 | - | 2700 | 3,96 | - | 9 | CL | Arcilla limoarenosa parda oscura. | - | - | |
| | 4 | 2,50 | 3,00 | 29,30 | 51 | 25 | 26 | 98,10 | 88,80 | 2,75 | 3600 | 5,28 | - | 12 | CH | Arcilla parda amarillenta con vetas grises, óxido y calizas. | 2,00 | 1,55 | |
| | 7 | 8,00 | 10,00 | 26,10 | 49 | 23 | 26 | 100,00 | 90,20 | 2,738 | 7200 | 10,56 | - | 24 | CL | Arcilla limosa parda amarillenta con vetas grises. | 2,10 | 1,67 | |
| Sondeo-2 | 7 | 8,00 | 8,50 | 28,3 | 38 | 22 | 16 | 100,00 | 79,60 | - | 2700 | 3,96 | - | 9 | CL | Arcilla limoarenosa parda amarillenta. | - | - | |
| | 8 | 9,00 | 9,50 | 19,00 | 34 | 21 | 13 | 100,00 | 38,30 | - | 1378,8 | - | 35 | 18 | SC | Arena arcillosa parda amarillenta con vetas grises y óxido. | 1,84 | 1,55 | |
| Sondeo-3 | 2 | 2,50 | 3,00 | 30,30 | 47 | 22 | 25 | 100,00 | 90,10 | 2,73 | 3600 | 5,28 | - | 12 | CL | Arcilla limosa parda oscura con vetas grises y calizas. | 2,10 | 1,61 | |
| | 6 | 9,00 | 9,50 | 23,60 | 33 | 21 | 12 | 100,00 | 38,30 | - | 3217,2 | - | 35 | 42 | SC | Arena arcillosa parda clara con vetas grises y óxido. | 2,04 | 1,65 | |
| | 9 | 14,50 | 15,00 | 24,60 | 49 | 24 | 25 | 100,00 | 91,20 | - | 14400 | 21,12 | - | 48 | CL | Arcilla limoarenosa parda amarillenta con vetas grises y óxido. | - | - | |
| Sondeo-4 | 2 | 1,50 | 2,00 | 27,90 | 32 | 20 | 12 | 84,40 | 35,20 | - | 6600 | 9,68 | - | 22 | SC | Arena limoarcillosa parda oscura con gravas. | - | - | |
| | 4 | 3,50 | 4,00 | 28,30 | 48 | 23 | 25 | 94,20 | 86,90 | - | 4500 | 6,60 | - | 15 | CL | Arcilla limosa amarillenta con vetas grises, óxido y calizas. | - | - | |
| | 9 | 16,50 | 17,00 | 25,60 | 49 | 23 | 26 | 100,00 | 91,20 | - | 12600 | 18,48 | - | 42 | CL | Arcilla limoarenosa parda amarillenta con vetas grises. | - | - | |

Ilustración 14. Formato guía de registro de perforaciones. **Fuente:** Ing. Guilliam Barboza

En los estudios de laboratorio encontramos el contenido de humedad (Wn), el análisis de consistencia, el porcentaje de la muestra que pasa por el tamiz No.4 y No. 200, la clasificación y descripción según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.). En algunos sondeos encontramos la gravedad específica (G_s) del suelo, en los que no se encontraba la dedujimos por medio de su clasificación (S.U.C.S) y la ilustración 14 (Gravedad específica de suelos).



| Tipo de Suelo | | Gravedad específica (G) |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Inorgánico | Grava | 2,65 |
| | Arena gruesa a media | 2,65 |
| | Arena fina (limosa) | 2,65 |
| | Loess, polvo de piedra y limo arenoso | 2,67 |
| Inorgánico | Arena algo arenosa | 2,65 |
| | Limo arenoso | 2,66 |
| | Limo | 2,67 – 2,70 |
| | Arena arcillosa | 2,67 |
| | Limo arcillo arenoso | 2,67 |
| | Arcilla arenosa | 2,70 |
| | Arcilla limosa | 2,75 |
| | Arcilla | 2,72 – 2,80 |
| | Orgánico | Limos con trazos de materia orgánica |
| Lodos aluviales orgánicos | | 2,13 – 2,60 |
| Turba | | 1,50 – 2,15 |

Ilustración 15. Gravedad específica de suelos. **Fuente:** Ing. Felipe J.Q.

Las propiedades faltantes se calcularon de la siguiente forma:

- Módulo de elasticidad:

$$\text{Módulo de elasticidad} = \text{No. de golpes} * 76.6$$

Ecuación (3) Módulo de elasticidad

- Coeficiente de uniformidad (Cu):

$$Cu = \text{No. de golpes} * 0.44$$

Ecuación (4) Coeficiente de uniformidad

- Ángulo de fricción interna (ϕ):

$$\phi = \sqrt{20 * \text{No. de golpes} + 20}$$

Ecuación (5) Ángulo de fricción interno

Cuando el resultado es mayor que 35, se coloca 35. No admite valores mayores.



- Peso unitario del suelo seco (γ_d) y peso unitario del suelo húmedo (γ_t):

$$\gamma_d = (0.23 * \ln(\text{No. de golpes})) + 1.18$$

Ecuación (6) Peso unitario del suelo seco

$$\gamma_t = \left(\frac{\gamma_d}{1 + \left(\frac{Wn}{100} \right)} \right)$$

Ecuación (7) Peso unitario del suelo húmedo

5.1.1.1. Ubicación de sondeos

Los sondeos recopilados se ubicaron en un mapa de la zona de estudio (Ilustración 10), en este mapa se puede observar la ubicación espacial y como están repartidos dichos sondeos en el sector de Getsemaní. Conociendo la ubicación y las características del sub suelo de los diferentes sondeos recolectados nos podemos hacer una idea del perfil del sub suelo de todo el sector de estudio.



5.1.2.1. Sondeos calle San Juan

➤ Profundidad 0-1 metros:

- Desde la superficie hasta 30 cm de profundidad se encuentran plantillas con baldosa y plantillas de cemento, posteriormente hasta el metro de profundidad se encuentran rellenos de escombros mixtos, arcillosos y ladrillo triturado.

➤ Profundidad 1-2 metros:

- Estrato de arena parda-clara-fina-húmeda de densidad media, con una consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes (ensayo SPT) aumenta de 8 a 12 golpes a medida que la profundidad aumenta.
- El nivel freático se encuentra a 1,8 metros de profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 4. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 2 metros. Calle San Juan

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 15.90 - 20.90 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 727.7 |
| C_u (t/m²) | 4.18 |
| γ_t (t/m³) | 1.70 |
| γ_d (t/m³) | 1.41 - 1.46 |

Fuente: Los autores

➤ Profundidad 2-6 metros:

- Estrato de arena gris, húmeda, confinada de densidad compacta, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 14 a 24 metros a medida que la profundidad aumenta.



- Propiedades del suelo:

Tabla 5. Propiedades granulométricas profundidad 2 – 6 metros. Calle San Juan

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 17.30 - 23.00 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 1149 - 1838.4 |
| C_u (t/m²) | 6.60 - 10.56 |
| γ_t (t/m³) | 1.80 - 1.91 |
| γ_d (t/m³) | 1.48 - 1.57 |

Fuente: Los autores

5.1.2.2. Sondeos calle Lomba N° 26a – 86

➤ Profundidad 0-0.5 metros:

- Los primeros 10 centímetros de profundidad están constituidos por plantillas y rellenos de nivelación, posteriormente hasta los 50 centímetros de profundidad se encuentran rellenos misceláneos y arena con escombros.

➤ Profundidad 0.5-1 metros:

- Estrato de arena fina-limosa- parda- clara- suelta, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 1 a 2 en este estrato.



- Propiedades del suelo:

Tabla 6. Propiedades granulométricas profundidad 0.5 – 1 metros. Calle Lomba N° 26a – 86

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 12.33 - 15.38 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 76.60 - 153.2 |
| C_u (t/m²) | 0.44 - 0.88 |
| γ_t (t/m³) | 1.34 - 1.70 |
| γ_d (t/m³) | 1.02 - 1.16 |

Fuente: Los autores

➤ Profundidad 1-3 metros:

- Estrato de arena gris clara húmeda con caracuchas, de densidad media, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 7 a 14 a medida que la profundidad aumenta.
- El nivel freático se encuentra a 1.5 metros de profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 7. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 3 metros. Calle Lomba N° 26a – 86

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 14.52 - 19.21 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 766 - 995.8 |
| C_u (t/m²) | 4.40 - 5.72 |
| γ_t (t/m³) | 1.70 - 1.77 |
| γ_d (t/m³) | 1.43 - 1.54 |

Fuente: Los autores

5.1.2.3. Sondeos Pedregal Calle Larga – Esquina

➤ Profundidad 0-0.5 metros:

- Estrato de rellenos sueltos con arena parda oscura.

➤ Profundidad 0.5-7 metros:

- Estrato de arena fina parda clara con densidad relativa mediana.
- El número de golpes aumenta de 10 a 30 a medida que aumenta la profundidad.
- El nivel freático se encuentra a 1.6 metros de profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 8. Propiedades granulométricas profundidad 0.5 – 7 metros. Calle Larga - Esquina.

| | |
|------------------------------------------------|-------------------|
| W_n (%) | - |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 1072.40 - 2298.00 |
| C_u (t/m²) | 6.16 - 13.2 |
| γ_t (t/m³) | 1.79 - 1.96 |
| γ_d (t/m³) | - |

Fuente: Los autores

5.1.2.4. Sondeos Calle Espíritu Santo No. 29-51

➤ Profundidad 0-1 metros:

- Los primeros 10 centímetros está compuesto de plantilla con baldosa y plantilla de cemento, luego se encuentra un estrato de relleno de escombros mixto, arcilloso y triturado.

➤ Profundidad 1-2 metros:

- Estrato de arena parda clara fina húmeda de densidad media, con consistencia no plástica y no líquida.



- El número de golpes aumenta de 8 a 12 a medida que la profundidad aumenta.
- Nivel freático se encuentra a 1.8 metros.
- Propiedades del suelo:

Tabla 9. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 2 metros. Calle Espíritu Santo No. 29 - 51.

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 12.90 - 15.60 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 766 |
| C_u (t/m²) | 4.40 |
| γ_t (t/m³) | 1.71 |
| γ_d (t/m³) | 1.48 - 1.51 |

Fuente: Los autores.

➤ Profundidad 2-6 metros:

- Estrato de arena gris, húmeda, confinada de densidad compacta, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 14 a 27 a medida que aumenta la profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 10. Propiedades granulométricas profundidad 2 – 6 metros. Calle Espíritu Santo No. 29 - 51

| | |
|------------------------------------------------|---------------|
| W_n (%) | 14.20 - 18.10 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 1149 - 2068.2 |
| C_u (t/m²) | 6.60 - 11.88 |
| γ_t (t/m³) | 1.80 - 1.94 |
| γ_d (t/m³) | 1.54 - 1.65 |

Fuente: Los autores

5.1.2.5. Sondeos Calle del Pozo No. 25-153

➤ Profundidad 0-0.8 metros:

- Los primeros 10 centímetros están constituidos por piso pulido, luego se encuentra un estrato de relleno de arena fina parda oscura con fragmentos de ladrillo rojo.

➤ Profundidad 0.8-2.5 metros:

- Estrato de arena fina parda clara con densidad relativa suelta, con consistencia no plástica y no suelta.
- El número de golpes aumenta de 4 a 20 a medida que la profundidad aumenta.



- Nivel freático se encuentra a 1.9 metros de profundidad.
- Propiedades del suelo:

Tabla 11. Propiedades granulométricas profundidad 0.8 – 2.5 metros. Calle del Pozo No. 25 – 153

| | |
|------------------------------------------------|--------|
| W_n (%) | 9.00 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 612.80 |
| Cu (t/m²) | 3.52 |
| γ_t (t/m³) | 1.66 |
| γ_d (t/m³) | 1.52 |

Fuente: Los autores

➤ Profundidad 2.5-6 metros:

- Estrato de arena fina parda con densidad relativa mediana, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 23 a 31 a medida que la profundidad aumenta.



- Propiedades del suelo:

Tabla 12. Propiedades granulométricas profundidad 2.5 - 6 metros. Calle del Pozo No. 25 – 153

| | |
|------------------------------------------------|-------------------|
| W_n (%) | 7 -11 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 2221.40 - 2374.60 |
| Cu (t/m²) | 12.76 - 13.64 |
| γ_t (t/m³) | 1.95 - 1.97 |
| γ_d (t/m³) | 1.76 - 1.84 |

Fuente: Los autores

5.1.2.6. Sondeos Calle Media Luna No. 9-36

➤ Profundidad 0-1 metros:

- Estrato de relleno de arena con demoliciones en estado suelto.

➤ Profundidad 1-9 metros:

- Estrato de arena fina parda clara con densidad relativa suelta, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 7 a 30 a medida que la profundidad aumenta.
- El nivel freático se encuentra a 2 metros de profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 13. Propiedades granulométricas profundidad 1 – 9 metros. Calle Media Luna No. 9 - 36

| | |
|------------------------------------------------|------------------|
| W_n (%) | 8 - 12 |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 536.20 - 1991.60 |
| Cu (t/m²) | 3.08 - 11.44 |
| γ_t (t/m³) | 1.63 - 1.93 |
| γ_d (t/m³) | 1.49 - 1.75 |

Fuente: Los autores

5.1.2.7. Sondeos Calle 2^a de la Magdalena N° 10-95

➤ Profundidad 0-0.6 metros:

- Estrato de plantilla en concreto sobre relleno de arena con demoliciones de construcción.

➤ Profundidad 0.6-3.6 metros:

- Estrato de arena fina parda con rastros de canto rodado menudo de mediana densidad relativa, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 9 a 38 a medida que la profundidad aumenta, en los primeros 2.40 metros de profundidad e este estrato, luego baja a valores entre 9 y 27 golpes por pie en los últimos 50 centímetros de profundidad del estrato.



- El nivel freático se encuentra a un metro de profundidad.
- Propiedades del suelo:

Tabla 14. Propiedades granulométricas profundidad 0.6 - 3.6 metros. Calle 2ª de la Magdalena N° 10 - 95

| | |
|------------------------------------------------|-----------------------|
| W_n (%) | - |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 1149 - 2910.8 - 689.4 |
| C_u (t/m²) | 6.60 - 16.72 - 3.96 |
| γ_t (t/m³) | 1.80 - 2.02 - 1.69 |
| γ_d (t/m³) | - |

Fuente: Los autores

➤ Profundidad 3.6-7 metros:

- Estrato de arena coralina gris con densidad relativa media, con consistencia no plástica y no líquida.
- El número de golpes aumenta de 6 a 63 a medida que la profundidad aumenta.



- Propiedades del suelo:

Tabla 15. Propiedades granulométricas profundidad 3.6 - 7 metros. Calle 2ª de la Magdalena N° 10 - 95

| | |
|------------------------------------------------|-----------------|
| W_n (%) | - |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 1225.6 - 1608.6 |
| Cu (t/m²) | 7.04 - 9.24 |
| γ_t (t/m³) | 1.82 - 1.88 |
| γ_d (t/m³) | - |

Fuente: Los autores

5.1.2.8.Sondeos Avenida del Pedregal N° 29-153

➤ Profundidad 0-1 metros:

- Estrato de relleno de arena parda oscura limosa con escombros.

➤ Profundidad 1-3.6 metros:

- Estrato de arena limosa gris oscura con densidad relativa suelta.
- El número de golpes permanece constante a lo largo del estrato, con un valor de 9 golpes x pie.
- El nivel freático se encuentra a 1.1 metros de profundidad.



- Propiedades del suelo:

Tabla 16. Propiedades granulométricas profundidad 1 - 3.6 metros. Avenida del Pedral N° 29 -153

| | |
|------------------------------------------------|--------|
| W_n (%) | - |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 6.89.4 |
| Cu (t/m²) | 3.96 |
| γ_t (t/m³) | 1.69 |
| γ_d (t/m³) | - |

Fuente: Los autores

➤ Profundidad 3.6 -5 metros:

- Estrato de arena carolina blancuzca con caracolejo de densidad relativa suelta, con consistencia no plástica y no liquida.
- El número de golpes se mantiene constante a lo largo del estrato, con un valor de 10 golpes por pie.
- Propiedades del suelo:

Tabla 17. Propiedades granulométricas profundidad 3.6 - 5 metros. Avenida del Pedral N° 29 -153

| | |
|------------------------------------------------|------|
| W_n (%) | - |
| G_s | 2.65 |
| Módulo de Elasticidad (t/m²) | 766 |
| Cu (t/m²) | 4.40 |
| γ_t (t/m³) | 1.71 |
| γ_d (t/m³) | - |

Fuente: Los autores



5.2.MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

Se recopiló datos topográficos, geológicos, geotécnicos que se encontraban disponibles en la zona de estudio.

Se constituyó un modelo digital superponiendo los aspectos y datos proporcionados por la zona, con lo cual se elaboró una cartografía sedimentológica. Se realizaron mapas estructurales con base a los sondeos recopilados. A continuación se describen las características de la zona de estudio complementaria a los sondeos previamente recolectados, para realizar el modelo geológico-geotécnico, dicha información se basa de la cartografía básica I.G.A.C 1994 de aguas de Cartagena: Emisario submarino; ordenanza 04/1996: límite de distrito; planeación distrital: corregimiento; Invias: red vial principal, establecidos para la zona de estudio. (Invias, 1994)

- ***Aptitud y uso del suelo:*** no se presenta el efecto de volcamiento de lodo, el suelo no es susceptible a fenómenos de remoción en masas, tales como caídas, volcamientos y desplazamiento.
- ***Cobertura vegetal:*** Poca cobertura vegetal, se caracteriza por ser una zona urbana.
- ***Geomorfológico:*** Se encuentran playones constituidos por lóbulos arenosos con fragmentos de concha y llanuras de manglar de superficie cenagosa constituidas por lodos y arenas finas.



- **Litológico:** Se encuentran depósitos de playón, acumulaciones de grava de origen lítico y biodetrítico, tales como fragmentos de concha y coral.

5.2.1. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Establecimos un modelo geomecánico gracias a la conformación del modelo geológico diseñado y las propiedades geotécnicas asignadas a cada unidad. Por último, elaboramos el modelo geotécnico de comportamiento el cual está constituido por el modelo geomecánico y los datos del comportamiento del suelo.

5.2.1.1. AVENIDA PEDREGAL

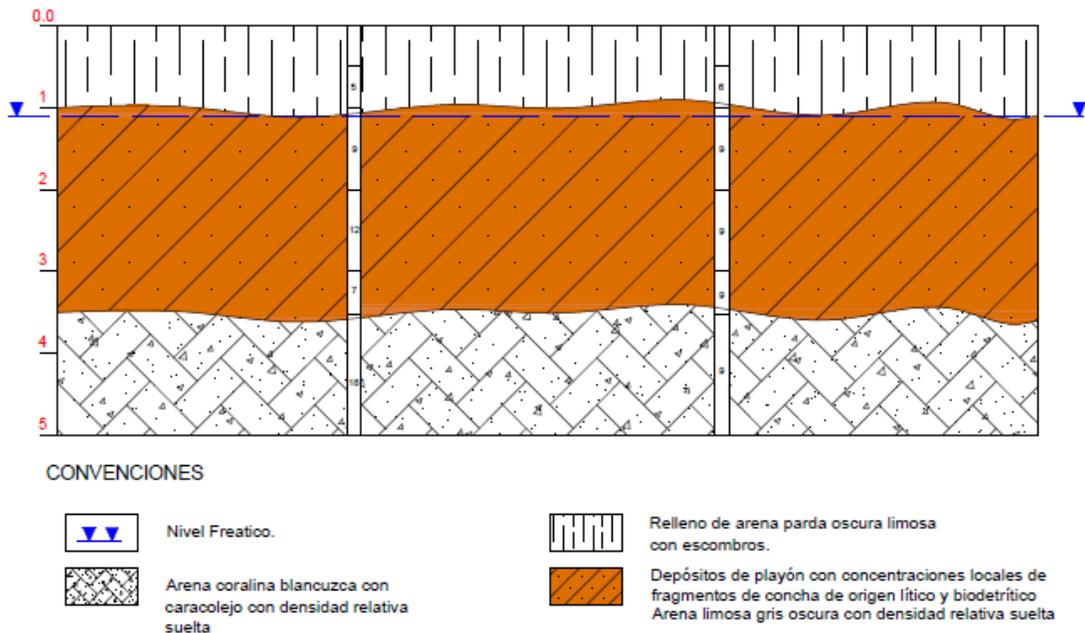


Ilustración 17. Modelo geológico-geotécnico Avenida Pedregal. Fuente: Los autores.

5.2.1.2. CALLE 2da MAGDALENA

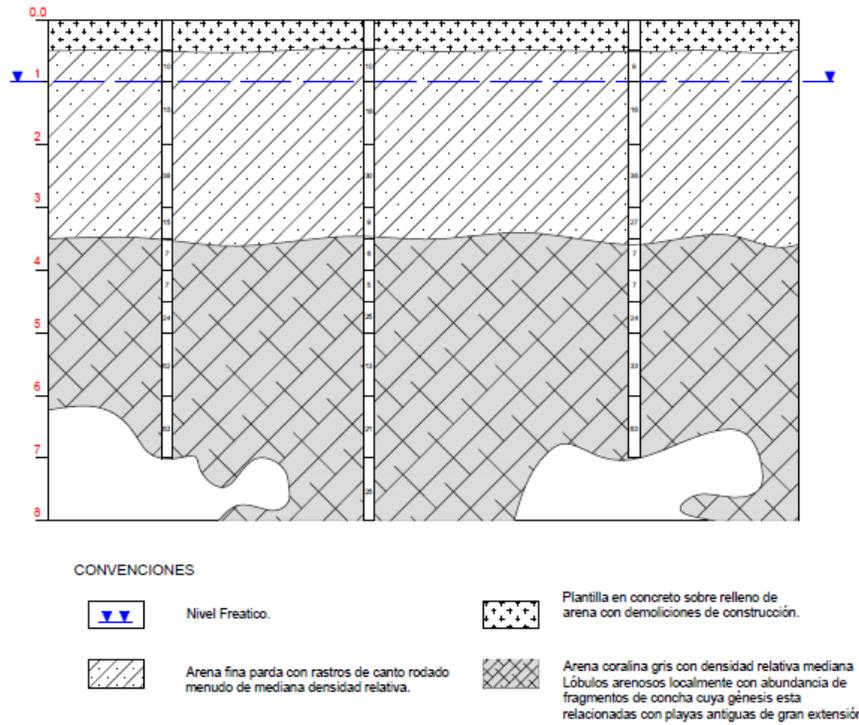


Ilustración 18. Modelo geológico-geotécnico Calle 2da de la Magdalena. Fuente: Los autores.

5.2.1.3. CALLE MEDIA LUNA

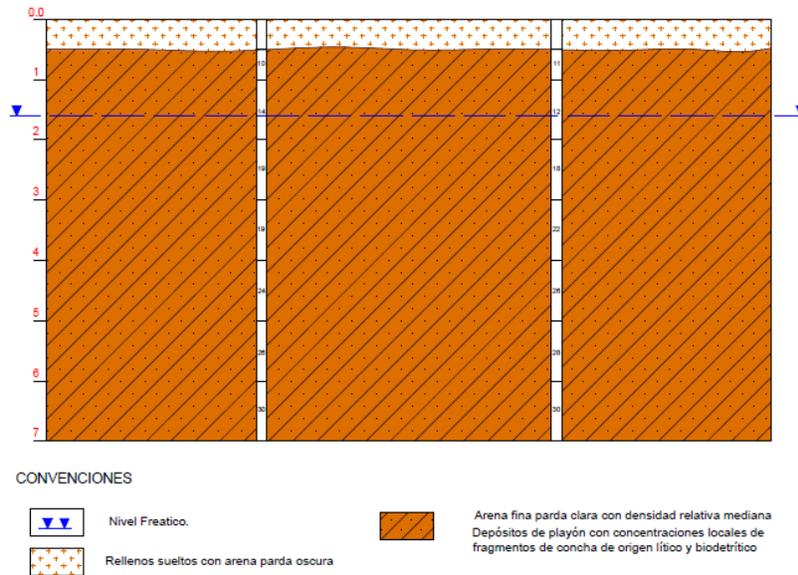


Ilustración 19. Modelo geológico-geotécnico Calle Media Luna. Fuente: Los autores.



5.2.1.4. CALLE DEL POZO

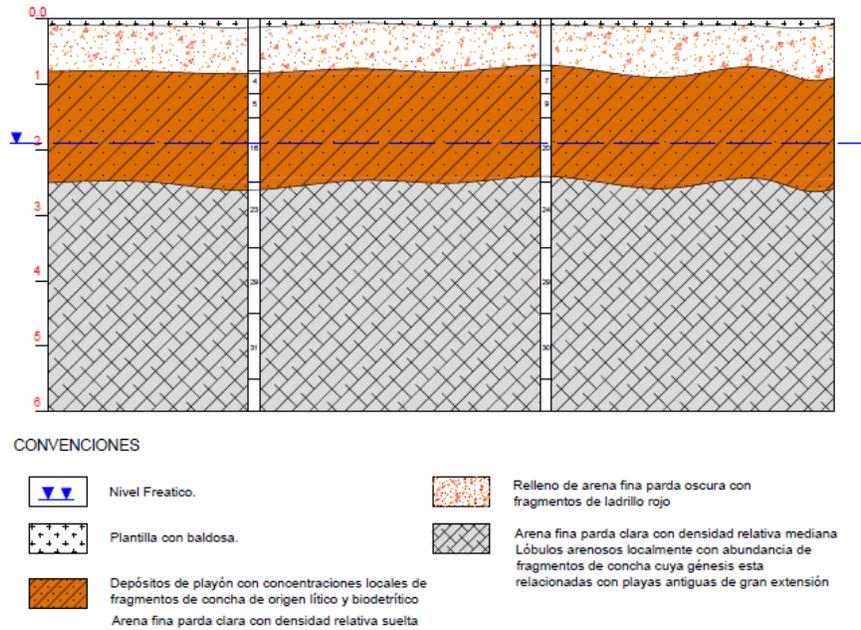


Ilustración 20. Modelo geológico-geotécnico Calle del Pozo. **Fuente:** Los autores.

5.2.1.5. CALLE ESPIRITU SANTO

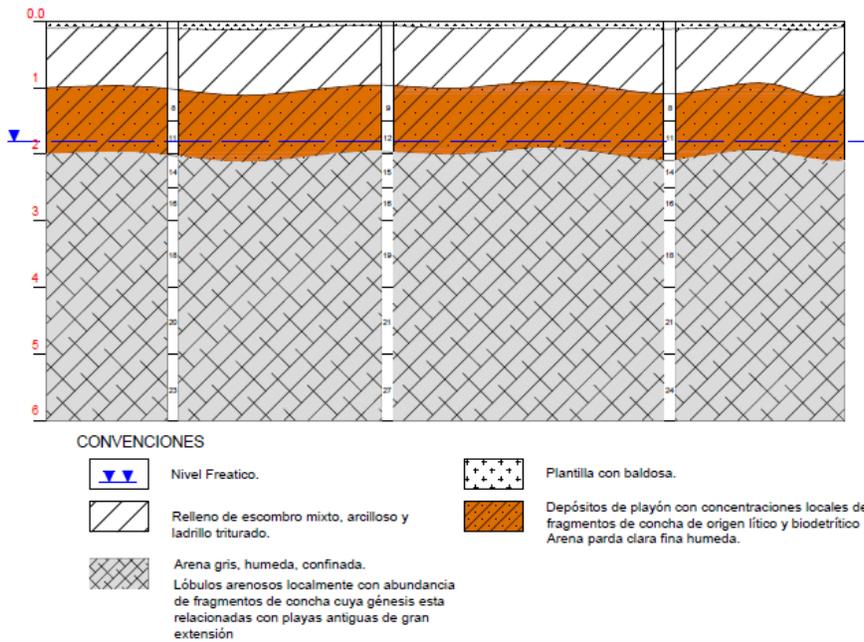


Ilustración 21. Modelo geológico-geotécnico Calle Espíritu Santo. **Fuente:** Los autores.

5.2.1.6. CALLE LARGA-ESQUINA

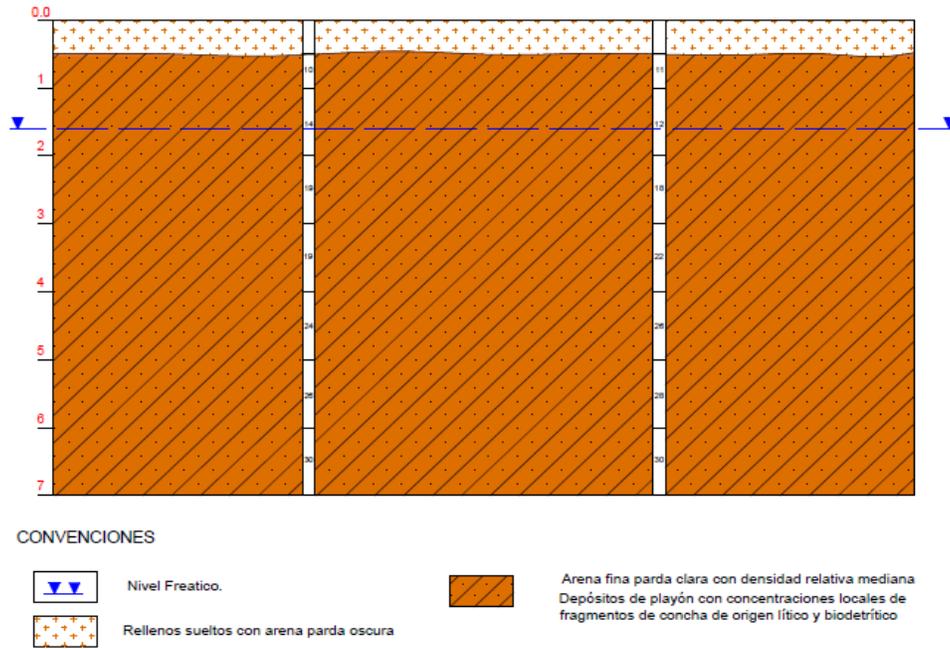


Ilustración 22. Modelo geológico-geotécnico Calle Larga-Esquina. Fuente: Los autores.

5.2.1.7. CALLE LOMBA

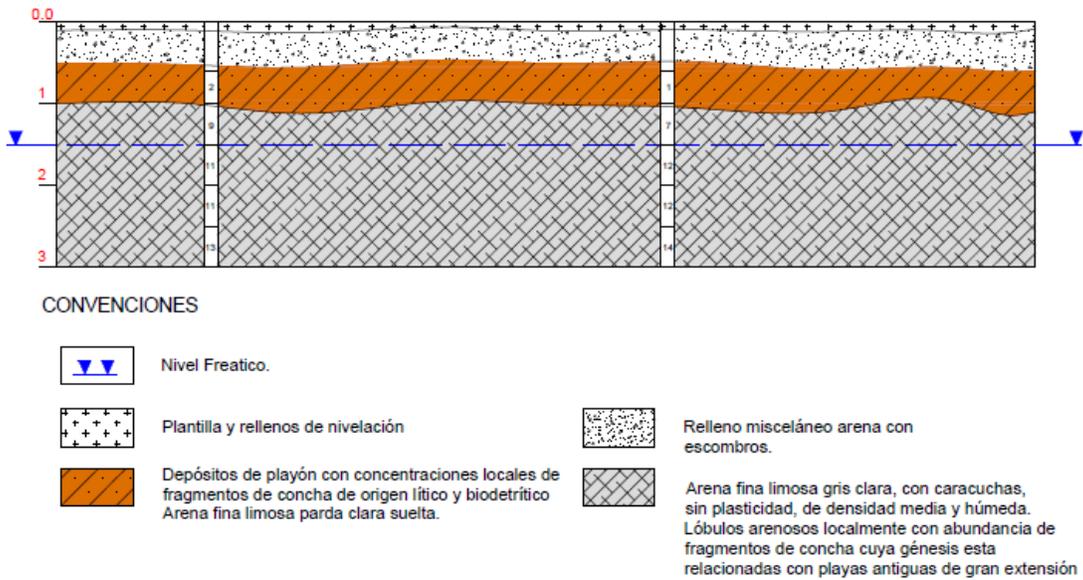


Ilustración 23. Modelo geológico-geotécnico Calle Lomba. Fuente: Los autores.

5.2.1.8. CALLE SAN JUAN

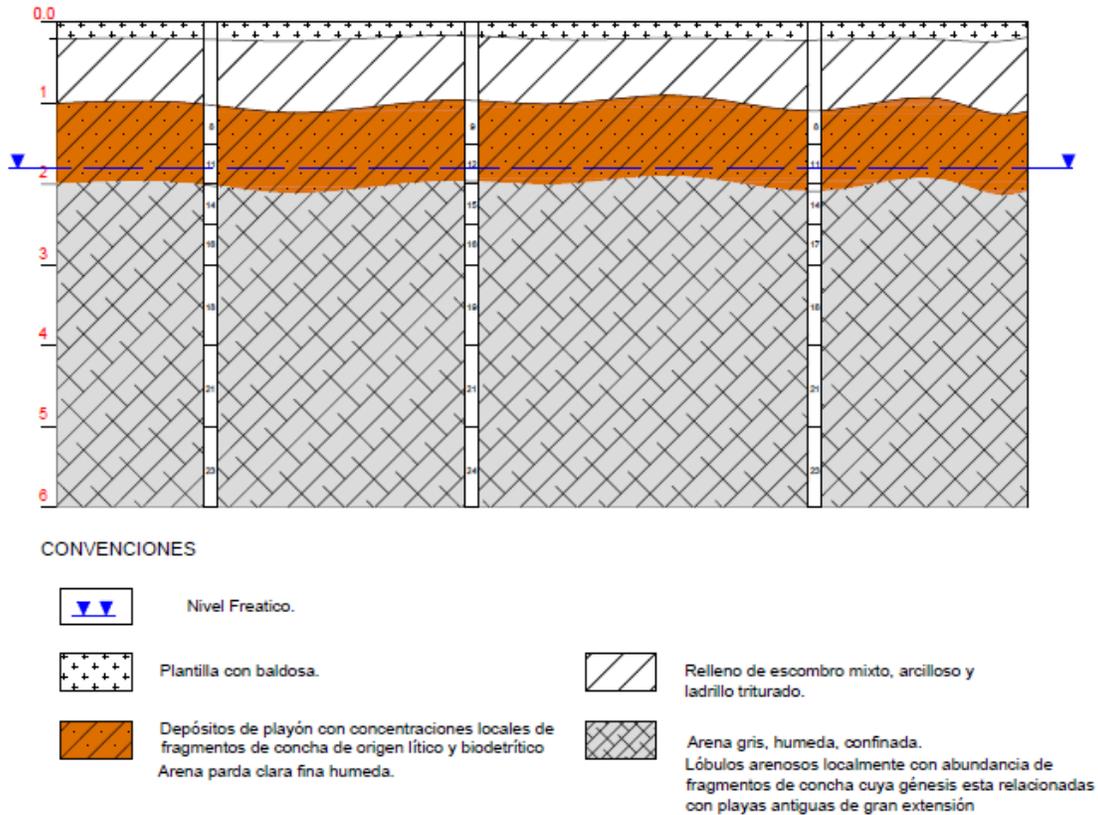


Ilustración 24. Modelo geológico-geotécnico Calle San Juan. Fuente: Los autores.

5.3. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN Y EXPANSIÓN

5.3.1. ANALISIS DE POTENCIAL DE LICUACION

Para realizar la evaluación del potencial de licuación del suelo usamos métodos empíricos tomando como base los ensayos SPT previamente recolectados, además de la velocidad de onda de corte (V_s) de los suelos de los diferentes sondeos. La metodología utilizada para evaluar el potencial de licuación fue la de Kishida y Ohsaki (1969 y 1970) y el de Seed et al. (1983).



Se tomó como guía el formato mostrado en la ilustración 16, en el cuál se encuentran de forma organizada todos los parámetros necesarios para determinar si el estrato es potencialmente licuable o no, las variables tales como el número de golpes de los ensayos SPT, el porcentaje de finos (%F), el índice de plasticidad (%IP) y el nivel freático (NP), fueron anteriormente determinadas.

| EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|------------|------|----|----|--------|--------|------------|-------------|------|----------------------|-------|-------|--------|---------------------|-----|---------------------------|------------------------|---------------|
| SECTOR CENTRO SONDEO CRITICO 1 Nmedido | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prof. | Nmedido | F | IP | NP | Gt | u | σ_v | σ'_v | rd | r_{prom}/σ'_v | Cn | CF | (N1)60 | r_{lic}/σ'_v | CP | $(r_{prom}/\sigma'_v)/CP$ | Condicion de licuacion | Observaciones |
| m | golpes/pie | % | % | m | ton/m3 | ton/m2 | ton/m2 | ton/m2 | | | | | | | | | | |
| 1.0 | 9 | 10.0 | | 1 | 1.70 | | 1.700 | 1.7 | 1.00 | 0.065 | 2.085 | 5.000 | 19 | 0.212 | 0.9 | 0.073 | 0.139 | No licuable |
| 2.0 | 16 | 7.0 | | 1 | 1.84 | 1.0 | 3.540 | 2.5 | 1.00 | 0.090 | 1.839 | 4.225 | 26 | 0.292 | 0.9 | 0.101 | 0.191 | No licuable |
| 3.0 | 38 | 7.0 | | 1 | 2.06 | 2.0 | 5.600 | 3.6 | 0.99 | 0.100 | 1.626 | 4.225 | 51 | 0.561 | 0.9 | 0.112 | 0.449 | No licuable |
| 3.5 | 27 | 7.0 | | 1 | 1.97 | 2.5 | 7.570 | 5.1 | 0.99 | 0.096 | 1.416 | 4.225 | 33 | 0.365 | 0.9 | 0.108 | 0.258 | No licuable |
| 4.0 | 7 | 12.0 | | 1 | 1.62 | 3.0 | 8.380 | 5.4 | 0.98 | 0.100 | 1.380 | 5.396 | 13 | 0.140 | 0.9 | 0.112 | 0.028 | No licuable |
| 4.5 | 7 | 12.0 | | 1 | 1.62 | 3.5 | 9.190 | 5.7 | 0.98 | 0.103 | 1.345 | 5.396 | 12 | 0.138 | 0.9 | 0.115 | 0.023 | No licuable |
| 5.0 | 24 | 10.0 | | 1 | 1.95 | 4.0 | 10.165 | 6.2 | 0.97 | 0.104 | 1.296 | 5.000 | 28 | 0.314 | 0.9 | 0.117 | 0.197 | No licuable |
| 6.0 | 33 | 10.0 | | 1 | 2.02 | 5.0 | 11.175 | 6.2 | 0.96 | 0.113 | 1.295 | 5.000 | 37 | 0.411 | 0.9 | 0.127 | 0.284 | No licuable |
| 7.0 | 63 | 10.0 | | 1 | 2.16 | 6.0 | 13.335 | 7.3 | 0.95 | 0.113 | 1.190 | 5.000 | 61 | 0.680 | 0.9 | 0.127 | 0.553 | No licuable |

Ilustración 25. Formato guía para evaluar los esfuerzos mediante el número de golpes y la profundidad de los estratos **Fuente:** Ing. Guilliam Barbosa.

Posteriormente hallamos los siguientes parámetros para determinar el potencial de licuación:

- **Presión de poros (U):** la hallamos teniendo en cuenta la profundidad del estrato, el nivel freático (NP) del sub suelo y la peso unitario del agua (γ_w).

$$U = (Profundidad - NP) * \gamma_w$$

Ecuación (8) Presión de poros



- **Esfuerzo vertical total (σ_v):** Se determina con el peso específico del estrato (Gt) y el espesor del estrato, posteriormente al esfuerzo vertical del siguiente estrato se le suma el esfuerzo vertical del estrato anterior.

$$\sigma_{v_1} = Gt * \text{Espesor del estrato}$$

$$\sigma_{v_2} = (Gt * \text{Espesor del estrato}) + \sigma_{v_1}$$

Ecuación (9) Esfuerzo vertical

- **Esfuerzo vertical efectivo (σ'_v):** Se determina teniendo en cuenta el esfuerzo vertical total (σ_v) y la presión de poros (U) del estrato.

$$\sigma'_v = \sigma_v - U$$

Ecuación (10) Esfuerzo vertical efectivo

- **Factor de reducción de esfuerzo (rd):** Varía con la profundidad dependiendo el perfil del estrato, se halla teniendo en cuenta la profundidad del estrato.

$$rd = EXP - \left(\frac{\text{Profundidad del estrato}}{38} \right)^{1.8}$$

Ecuación (11) Factor de reducción de esfuerzo

- **Relación de los esfuerzos cortantes cíclicos:**

$$\frac{T_{prom}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} rd$$

Ecuación (1) Relación de esfuerzos cortantes cíclicos



a_{max} = Máxima aceleración en el lugar según las leyes de la atenuación.

g = Aceleración de la gravedad.

- **Corrección por equipo:** Con el fin que todos los resultados sean compatibles, se efectúan correcciones teniendo en cuenta los equipos utilizados para hacer el ensayo de penetración estándar (SPT).

Tabla 18. Factores de Corrección para los Valores de N medidos en el SPT

| Factor | Variable | Símbolo | Corrección |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------|
| Presión de sobrecarga. | | $C_N =$ | $(Pa/\sigma'_{vo})^{0.5} *$ C_N menor o igual que 2 |
| Relación de energía | Martillo cilíndrico Martillo de seguridad Martillo automático - Cilíndrico | $C_E =$ | 0.5-1.0 0.7-1.2 0.8-1.3 |
| Díámetro de la perforación | 65 – 115 mm 150 mm 200 mm | $C_B =$ | 1.0 1.05 1.15 |
| Longitud del varillaje | Figura 31 | $C_R =$ | |
| Tipo de muestreador con espacio para Liners, pero no se usan Liners durante el muestreo. | | $C_S =$ | $1 + \frac{N_{1,60}}{100}$ |

Fuente: (Seed et. al , 2001).

*Pa = Presión atmosférica.

- **Corrección por presión de confinamiento:** El número de golpes del ensayo SPT de un mismo tipo de suelo, tiende a aumentar a medida que aumenta la profundidad y la presión de confinamiento. Para que todos los resultados sean compatibles se tiene que normalizar el número de golpes a una misma presión de confinamiento, en nuestro caso 1 Kg/cm².



$$C_n = 1 - 1.41 \text{ LOG}\left(\frac{\sigma_v'}{\sigma_{v'1}}\right)$$

Ecuación (12) Corrección por presión de confinamiento

$$\sigma_{v'1} = 1 \text{ Kg/cm}^2.$$

- **Corrección por contenidos de finos:** Las partículas que pasan por el tamiz No. 200 tienen una gran importancia en la licuación por eso es necesario realizar una corrección por contenido de finos al número de golpes del ensayo SPT.

$$C_f = 5 * \text{LOG}(\%F)$$

Ecuación (13) Corrección por contenidos de finos

- **Número de golpes corregido:**

$$(N1)_{60} = N * C_n * \frac{\text{Energía transmitida por el equipo}}{60} * C_f$$

Ecuación (14) Número de golpes corregidos

- **Coefficiente de resistencia cíclica (CRR):**

$$\frac{T_{lic}}{\sigma_v'} = 0.0111 * (N1)_{60}$$

Ecuación (15) Coeficiente de resistencia cíclica



- **Corrección por plasticidad:** La plasticidad de la fracción fina presenta un incremento en la resistencia cíclica. Los valores del esfuerzo cíclico actuante se deben corregir teniendo en cuenta la plasticidad, para esto se tienen que dividir por el factor de plasticidad (C_p).

$$C_p = 0.89 + (IP * 0.022)$$

Ecuación (16) Corrección por plasticidad

- **Requisitos de licuación:** Para que un suelo presente licuación es necesario que el esfuerzo actuante corregido por plasticidad sea mayor que el esfuerzo necesario para que se presente el fenómeno de licuación en el suelo, por consiguiente para que se presente

licuación es necesario que $\frac{T_{prom}}{\sigma'_{v'}} / C_p > \frac{T_{lic}}{\sigma'_{v'}}$.

5.3.2. RESULTADOS

Después de organizar todos los sondeos de acuerdo al formato guía de potencial de licuación (Ilustración 25) y hallar todos los parámetros anteriormente descritos para cada estrato de los diferentes sondeos, se obtuvo que los estratos de los sondeos recopilados no son licuables.



5.4. COMPORTAMIENTO SÍSMICO

5.4.1. ANÁLISIS DE RECURRENCIA SÍSMICA

Se recopiló información sobre los eventos sísmicos desde 1.993 hasta 2.016, en un área circular con radio de 100 km, teniendo como centro el casco urbano de Cartagena, realizando así una consulta experta el cual nos arrojó un reporte de consulta que tenía en cuenta las fechas en las cuales ocurrieron un sismo. A continuación se tiene un formulario para ubicar los sismos en Colombia.

| Rango Tiempo | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------|--------------|-----|-----|
| Fecha Mínima | | | Fecha Máxima | | |
| Año | Mes | Día | Año | Mes | Día |
| 01/06/1993 | | | 10/10/2016 | | |
| Seleccione el tipo de Consulta <input checked="" type="radio"/> Consulta Circular <input type="radio"/> Consulta Cuadrante | | | | | |
| Coordenadas límite en el espacio, coordenadas geográficas | | | | | |
| Longitud Mínima | -90 | Longitud Máxima | -86 | | |
| Latitud Mínima | -07 | Latitud Máxima | 15 | | |
| Centro y radio del círculo | | | | | |
| Latitud Central | 10.4 | Longitud Central | -75.5 | | |
| Radio (Km) | | | 100 | | |
| Rango de Magnitud local (Ml) | | | | | |
| Magnitud Mínima | 0 | Magnitud Máxima | 9 | | |
| Rango de Magnitud de momento (Mw) | | | | | |
| Magnitud Mínima | 0 | Magnitud Máxima | 9 | | |
| Rango de Profundidad, Km | | | | | |
| Profundidad Mínima | 0 | Profundidad Máxima | 1000 | | |
| Errores, Seg. | | | | | |
| RMS Mínima | 0 | RMS Máxima | 10 | | |
| Gap, Grados | | | | | |
| Gap Mínimo | 0 | Gap Máximo | 360 | | |
| Error en Profundidad, Longitud, Latitud (Km) | | | | | |
| Error Profundidad Mínima | 0 | Error Profundidad Máxima | 999 | | |
| Error Longitud Mínima | 0 | Error Longitud Máxima | 999 | | |
| Error Latitud Mínima | 0 | Error Latitud Máxima | 999 | | |

Ilustración 26. Consulta en la red sismológica nacional. **Fuente:** (Servicio geológico colombiano)

Luego de recopilar la información de los sismos, la página de la red sismológica nacional de Colombia, facilitó el mapa de sismicidad el cual muestra los puntos de los sismos ocurridos cerca a Cartagena desde 1993 hasta el 2016.



SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO
Red Sismologica Nacional de Colombia
Mapa de Sismicidad

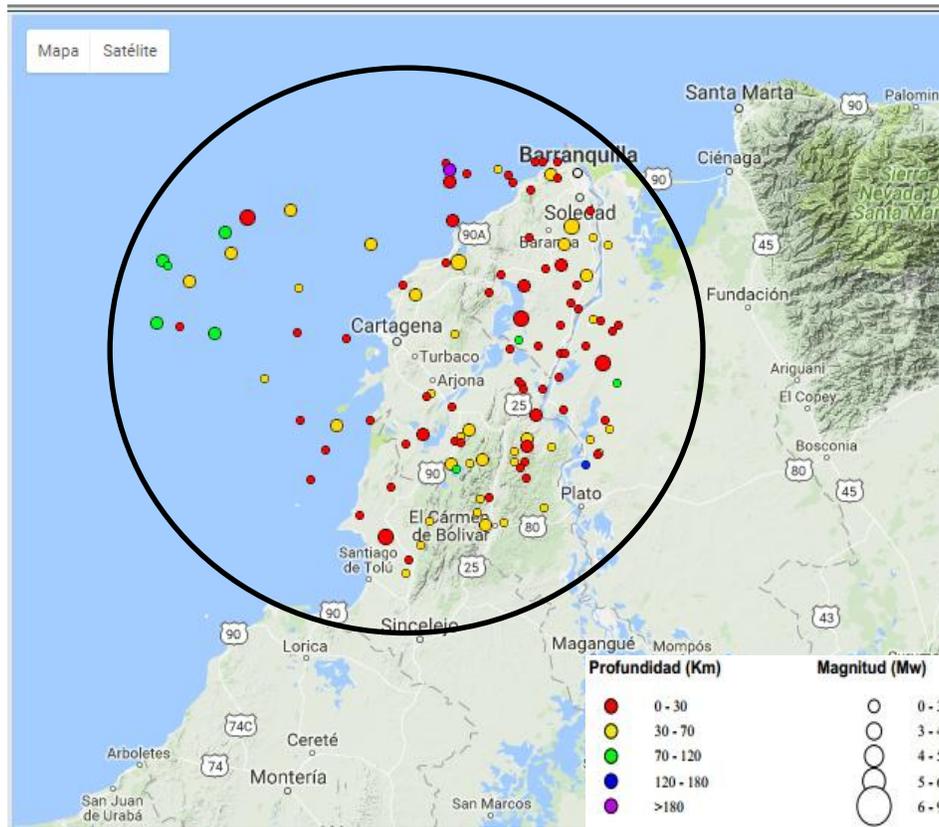


Ilustración 27. Sismos no asignados para Cartagena r=100km. Fuente: (Servicio geológico colombiano)

Con esta información se hizo un análisis de recurrencia sísmica para determinar la frecuencia de sismos y la máxima magnitud que se puede esperar en esta zona de influencia.

En la tabla 19, se indican las magnitudes de los sismos ocurridos según la red sismológica y el número de veces que ocurrió dentro de los 100km de radio.



Tabla 19. Magnitudes de sismos y cantidades de sismos

| MAGNITUD (MI) | Nº |
|---------------|----|
| 1.4 | 3 |
| 1.5 | 4 |
| 1.6 | 1 |
| 1.7 | 3 |
| 1.8 | 7 |
| 1.9 | 6 |
| 2 | 7 |
| 2.1 | 8 |
| 2.2 | 5 |
| 2.3 | 7 |
| 2.4 | 6 |
| 2.5 | 9 |
| 2.6 | 7 |
| 2.7 | 6 |
| 2.8 | 7 |
| 2.9 | 3 |
| 3 | 4 |
| 3.1 | 3 |
| 3.2 | 6 |
| 3.3 | 2 |
| 3.4 | 2 |
| 3.5 | 3 |
| 3.6 | 3 |
| 3.7 | 3 |
| 3.8 | |
| 3.9 | |
| 4 | 1 |
| 4.1 | |
| 4.2 | 2 |
| 4.3 | 2 |
| 4.4 | |
| 4.5 | 1 |
| 4.6 | 3 |

Fuente: Los autores

la cual muestra la relación entre la magnitud de los sismos y el número de sismos acumulados según la consulta realizada.

Tabla 20. Magnitud total

| ≥MI | Nº |
|-----|-----|
| 1 | 124 |
| 1.5 | 121 |
| 2 | 100 |
| 2.5 | 67 |
| 3 | 35 |
| 3.5 | 18 |
| 4 | 9 |
| 4.5 | 4 |
| 4.6 | 3 |

Fuente: Los autores

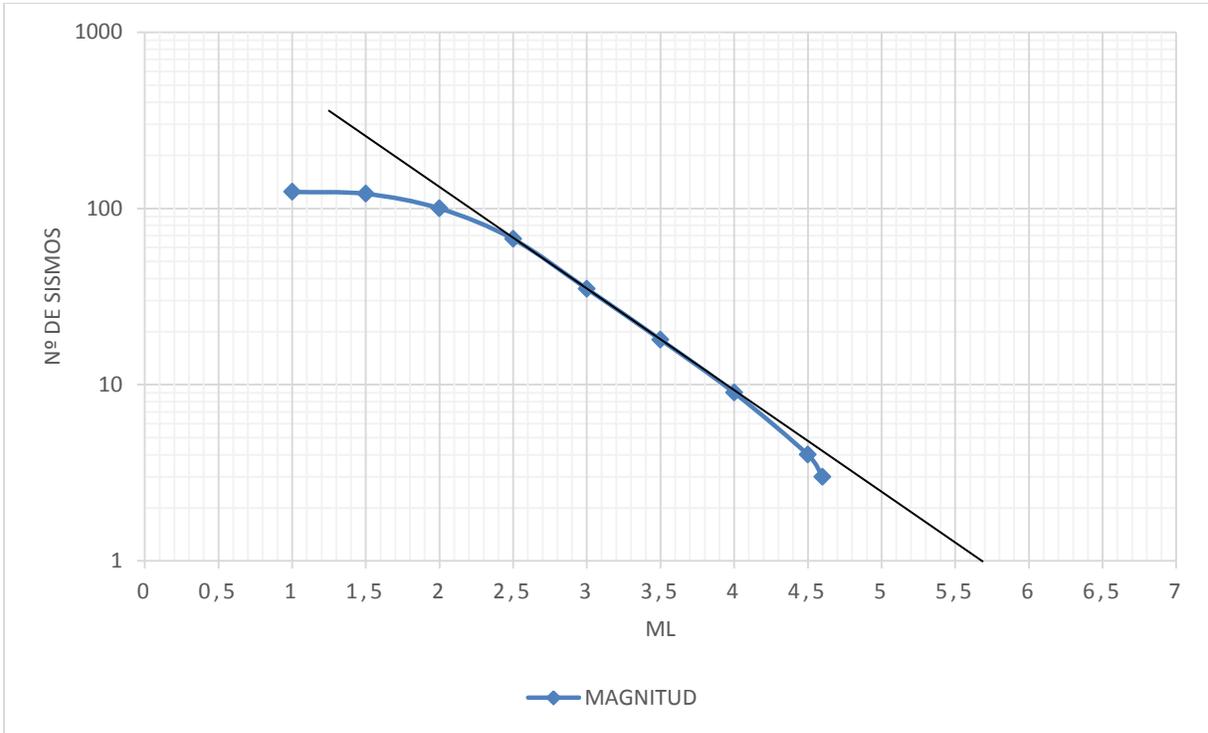
La relación presenta mayor cantidad entre los sismos de magnitud 1.8 y 2.5 grados en la escala de Richter.

A continuación, en la gráfica 1, se presenta la relación entre los números de sismos contra la magnitud. La mayoría de los sismos consultados se encuentran entre 1 y 3 grados en la escala de Gutenberg-Richter. De tal forma, los sismos futuros que pueden ocurrir, serán moderados y el máximo que se encontrará puede ser de 5.8 grados aprox.

Para realizar la curva de recurrencia, se debe tener en cuenta la información de la tabla 20,



Curva de magnitud vs número de sismos



Gráfica 1. Curva de magnitud sísmica con respecto a número de sismos presentados. **Fuente:** Los autores.



5.4.2. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE

Para hallar la variación de la velocidad de onda con respecto a la profundidad, se evaluarán diferentes correlaciones entre el número de golpes, obtenido en los estudios de suelo que proporcionaron los ingenieros previamente, y dicha velocidad. En la siguiente tabla se enuncian las correlaciones evaluadas:

| Investigadores | Ecuación | Observaciones |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Imai y Yoshimura (1970) | $V_s = 76N^{0.33}$ | |
| Ohba y Toriumi (1970) | $V_s = 84N^{0.31}$ | |
| Imai (1977) | $V_s = aN^b$ | a=102, b=0.29 Arcilla Holoceno a= 81, b=0.33 Arena Holoceno a=114, b=0.29 Arcilla Pleistoceno a= 97, b=0.32 Arena Pleistoceno |
| Ohta y Goto (1978) | $V_s = 85.34N^{0.346}$ | Para todo tipo de suelo |
| Okamoto <i>et al.</i> (1989) | $V_s = 125N^{0.3}$ | Arena del Pleistoceno |
| Japan Road Association (2002) | $V_s = 80N^{1/3}$ $V_s = 100N^{1/3}$ | Arenas Arcilla |
| Vs=velocidad de ondas de corte en m/s; N=numero de golpes del SPT | | |

Ilustración 28. Correlaciones según investigadores **Fuente:** Castillo, 2007

$$V_s = 125N^{0.3}$$

Ecuación (17) Ecuación de Okamoto et al.

La ecuación que mejor se ajusta con nuestra información es la de Okamoto, por consiguiente decidimos utilizarla para determinar la velocidad de corte (V_s), a diferentes profundidades en los sondeos. El valor que utilizamos fue el de número de golpes corregidos (N_{160}) dando como resultado lo siguiente:



Tabla 21. Velocidad de onda de corte - Av. Pedregal

| Av. Pedregal | | | | | |
|--------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 0.0 | - | - | 0.0 | - |
| 12 | 1.0 | 263.4 | 15 | 1.0 | 281.7 |
| 17 | 2.0 | 292.4 | 19 | 2.0 | 302.4 |
| 22 | 3.0 | 316.0 | 19 | 3.0 | 302.4 |
| 14 | 4.0 | 275.9 | 17 | 4.0 | 292.4 |
| 18 | 5.0 | 297.5 | 16 | 5.0 | 287.2 |

Fuente: Los autores

Tabla 22. Velocidad de onda de corte - Calle 2da de la Magdalena

| Cll. 2ª de la Magdalena | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | | Sondeo 3 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 0.0 | - | - | 0.0 | - | - | 0.0 | - |
| 21 | 1.0 | 311.6 | 21 | 1.0 | 311.6 | 19 | 1.0 | 302.4 |
| 26 | 2.0 | 332.2 | 26 | 2.0 | 332.2 | 26 | 2.0 | 332.2 |
| 51 | 3.0 | 406.6 | 41 | 3.0 | 380.8 | 51 | 3.0 | 406.6 |
| 12 | 4.0 | 263.4 | 10 | 4.0 | 249.4 | 13 | 4.0 | 269.8 |
| 29 | 5.0 | 343.3 | 30 | 5.0 | 346.8 | 28 | 5.0 | 339.7 |
| 66 | 6.0 | 439.3 | 18 | 6.0 | 297.5 | 37 | 6.0 | 369.3 |
| 62 | 7.0 | 431.1 | 25 | 7.0 | 328.3 | 61 | 7.0 | 429.1 |
| | | | 27 | 8.0 | 336.0 | | | |

Fuente: Los autores



Tabla 23. Velocidad de onda de corte - Calle Media luna

| Cll. Media Luna | | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 1.0 | - | 12 | 1.0 | 263.4 |
| 18 | 2.5 | 297.5 | 21 | 2.5 | 311.6 |
| 24 | 3.5 | 324.3 | 29 | 3.5 | 343.3 |
| 24 | 4.5 | 324.3 | 31 | 4.5 | 350.2 |
| 26 | 5.5 | 332.2 | | | |
| 27 | 6.5 | 336.0 | | | |
| 28 | 7.5 | 339.7 | | | |
| 29 | 8.5 | 343.3 | | | |

Fuente: Los autores

Tabla 24. Velocidad de onda de corte - Calle del Pozo

| Cll. Del Pozo | | | | | |
|---------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 0.8 | - | - | 0.8 | - |
| 23 | 2.5 | 320.2 | 28 | 2.5 | 339.7 |
| 28 | 3.5 | 339.7 | 30 | 3.5 | 346.8 |
| 32 | 4.5 | 353.6 | 33 | 4.5 | 356.8 |
| 34 | 5.5 | 360.0 | 33 | 5.5 | 356.8 |

Fuente: Los autores



Tabla 25. Velocidad de onda de corte - Calle Espíritu Santo

| Cll. Espíritu Santo | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | | Sondeo 3 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 1.0 | - | - | 1.0 | - | - | 1.0 | - |
| 22 | 2.0 | 316.0 | 24 | 2.0 | 324.3 | 22 | 2.0 | 316.0 |
| 27 | 3.0 | 336.0 | 27 | 3.0 | 336.0 | 28 | 3.0 | 339.7 |
| 27 | 4.0 | 336.0 | 28 | 4.0 | 339.7 | 27 | 4.0 | 336.0 |
| 28 | 5.0 | 339.7 | 29 | 5.0 | 343.3 | 29 | 5.0 | 343.3 |
| 29 | 6.0 | 343.3 | 33 | 6.0 | 356.8 | 30 | 6.0 | 346.8 |

Fuente: Los autores

Tabla 26. Velocidad de onda de corte - Calle Larga

| Cll. Larga | | | | | |
|------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 0.0 | - | - | 0.0 | - |
| 19 | 1.0 | 302.4 | 21 | 1.0 | 311.6 |
| 23 | 2.0 | 320.2 | 20 | 2.0 | 307.1 |
| 27 | 3.0 | 336.0 | 26 | 3.0 | 332.2 |
| 25 | 4.0 | 328.3 | 28 | 4.0 | 339.7 |
| 28 | 5.0 | 339.7 | 30 | 5.0 | 346.8 |
| 29 | 6.0 | 343.3 | 31 | 6.0 | 350.2 |
| 31 | 7.0 | 350.2 | 31 | 7.0 | 350.2 |

Fuente: Autores



Tabla 27. Velocidad de onda de corte - Calle Lomba

| Cll. Lomba | | | | | |
|------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 0.0 | - | - | 0.0 | - |
| 9 | 1.0 | 241.6 | 7 | 1.0 | 224.1 |
| 23 | 2.0 | 320.2 | 24 | 2.0 | 324.3 |
| 24 | 3.0 | 324.3 | 25 | 3.0 | 328.3 |

Fuente: Autores

Tabla 28. Velocidad de onda de corte - Calle Sam Juan

| Cll. San Juan | | | | | | | | |
|---------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | | Sondeo 3 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| - | 1.0 | - | - | 1.0 | - | 0 | 1.0 | - |
| 24 | 2.0 | 324.3 | 25 | 2.0 | 328.3 | 24 | 2.0 | 324.3 |
| 29 | 3.0 | 343.3 | 29 | 3.0 | 343.3 | 30 | 3.0 | 346.8 |
| 29 | 4.0 | 343.3 | 30 | 4.0 | 346.8 | 29 | 4.0 | 343.3 |
| 30 | 5.0 | 346.8 | 30 | 5.0 | 346.8 | 30 | 5.0 | 346.8 |
| 31 | 6.0 | 350.2 | 31 | 6.0 | 350.2 | 31 | 6.0 | 350.2 |

Fuente: Los autores

Luego con la velocidad de onda de corte hallada en los sondeos, procedemos a hallar otros parámetros importantes para el comportamiento sísmico del suelo del sector, tales como:

- **Velocidad de onda de compresión (V_p):** Al momento de hallar la velocidad de onda de compresión, tomamos en cuenta los siguientes parámetros: La velocidad de onda de corte a una determinada profundidad, y la relación entre la velocidad de ondas de compresión



y la velocidad de ondas de corte (V_p/V_s) proporcionadas por un estudio down hole realizado por el Ing. Guilliam Barboza en la zona de Getsemaní. Normalmente los valores de V_p son mayores entre 70 % y 140% que el V_s , en nuestro caso son un poco mayores debido a que el nivel freático del suelo se encuentra a una profundidad relativamente pequeña en los sondeos realizados.

$$V_p = V_s * \frac{V_p}{V_s}$$

Ecuación (18) Velocidad de onda de corte

- **Relación de Poisson (μ):** Debido a que la relación de la velocidad de compresión y la velocidad de corte (V_p/V_s) es alta, La relación de Poisson nos da un valor elevado.

$$\mu = \frac{\frac{V_p^2}{V_s} - 2}{2 * \frac{V_p^2}{V_s} - 2}$$

Ecuación (19) Relación de Poisson

- **Densidad (ρ):** La densidad fue proporcionada por un estudio de down hole hecho por el ingeniero Guilliam Barboza.
- **Módulo de rigidez al esfuerzo cortante máximo ($G_{m\acute{a}x}$):** El módulo de cortante máximo es un parámetro importante tanto para análisis geotécnicos dinámicos, tal como la cimentación de maquinarias o de sismos de pequeña magnitud, y para análisis geotécnicos estáticos, como es el diseño de cimentaciones con valores de $G_{m\acute{a}x}$ corregidos para niveles de deformación pertinentes.



$$G_{\text{máx}} = \frac{\rho}{9.81} \times \frac{Vs^2}{10000}$$

Ecuación (20) Modulo de rigidez al cortante máximo

- **Módulo dinámico (Edinámico):** Depende del módulo de cortante máximo, es muy usado en cimentaciones de zapatas y losas de cimentación en arenas, reduciéndolo en función de la deformación angular.

$$E_{\text{din}} = (2G_{\text{máx}})(1 + \mu)$$

Ecuación (21) Módulo dinámico

A continuación se mostraran los resultados tabulados de las velocidades de ondas halladas y los parámetros anteriormente mencionados:

Tabla 29. Velocidad de ondas de compresión - Av. Pedregal

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | G _{máx} (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1630 | 3270 | 272.5 | 12 | 0.50 | 1234 | 3693 |
| 3.5 | 1560 | 2969 | 296.9 | 10 | 0.49 | 1402 | 4191 |
| 5 | 1440 | 1729.8 | 288.3 | 6 | 0.49 | 1220 | 3625 |

Fuente: Los autores

Tabla 30. Velocidad de ondas de compresión - Cll. 2da de la Magdalena

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | G _{máx} (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------------------|-----------------------------------|
| 0.5 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 3.5 | 1560 | 3249 | 324.9 | 10 | 0.49 | 1679 | 5019 |
| 7 | 1440 | 2065.8 | 344.3 | 6 | 0.49 | 1740 | 5171 |

Fuente: Los autores



Tabla 31. Velocidad de ondas de compresión - CII. Media luna

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1630 | 3160.8 | 263.4 | 12 | 0.50 | 1153 | 3450 |
| 9 | 1560 | 3316 | 331.6 | 10 | 0.49 | 1749 | 5228 |

Fuente: Los autores

Tabla 32. Velocidad de ondas de compresión - CII. del Pozo

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0.1 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 0.8 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 2.5 | 1560 | 3299 | 329.9 | 10 | 0.49 | 1731 | 5175 |
| 6 | 1440 | 2113.8 | 352.3 | 6 | 0.49 | 1822 | 5414 |

Fuente: Los autores

Tabla 33. Velocidad de ondas de compresión - CII. Espíritu Santo

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0.1 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 1 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 2 | 1560 | 3187 | 318.7 | 10 | 0.49 | 1615 | 4829 |
| 6 | 1440 | 2048.4 | 341.4 | 6 | 0.49 | 1711 | 5084 |

Fuente: Los autores

Tabla 34. Velocidad de ondas de compresión - CII. Larga

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0.5 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 7 | 1560 | 3327 | 332.7 | 10 | 0.49 | 1760 | 5263 |

Fuente: Los autores



Tabla 35. Velocidad de ondas de compresión - Cll. Lomba

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0.1 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 0.6 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 1 | 1560 | 2329 | 232.9 | 10 | 0.49 | 863 | 2579 |
| 3 | 1440 | 1945.8 | 324.3 | 6 | 0.49 | 1544 | 4587 |

Fuente: Los autores

Tabla 36. Velocidad de ondas de compresión - Cll. San Juan

| Prof. (m) | ρ (Kg/m ³) | Vp (m/s) | Vs (m/s) | Vp/Vs | m | Gmáx (Kg/cm ²) | E. dinámico (Kg/cm ²) |
|-----------|-----------------------------|----------|----------|-------|------|----------------------------|-----------------------------------|
| 0.2 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 1 | 1630 | - | - | 12 | 0.50 | - | - |
| 2 | 1560 | 3257 | 325.7 | 10 | 0.49 | 1687 | 5044 |
| 6 | 1440 | 2079 | 346.5 | 6 | 0.49 | 1762 | 5237 |

Fuente: Los autores

5.4.1. CLASIFICACIÓN DE PERFIL DE SUELO

Posteriormente a hallar la velocidad de onda de corte a determinadas profundidades de los distintos sondeos, procedemos a realizar la clasificación sísmica del suelo del sector con base a los estudios recopilados. Para esto usamos la tabla A.2.4-1 (Clasificación de los perfiles de suelo) de la norma NSR-10 y la velocidad de onda de corte promedio de cada sondeo.



Tabla 37. Clasificación de perfil de suelos

| 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 $> v_s \geq 760$ 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 $> v_s \geq 360$ m/s |
| | perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios | $N \geq 50$, ó $s_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²) |
| D | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 360 m/s $> v_s \geq 180$ m/s |
| | perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones | $50 > N \geq 15$, ó 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) $> s_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²) |
| E | Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 180 m/s $> v_s$ |
| | perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas | $IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) $> s_u$ |
| F | <p>Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <p>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.</p> <p>F2- Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3$ m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas).</p> <p>F3- Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5$ m con Índice de Plasticidad $IP > 75$)</p> <p>F4- Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36$ m)</p> | |

Fuente: Tomado de norma sismo resistente NRS-10.

Dando como resultado que el perfil del suelo del sector de Getsemaní es de tipo D, teniendo como base los sondeos recopilados, ya que el promedio de las velocidades de onda de corte de los sondeos se encuentran entre 180 m/s y 360 m/s.



5.4.2. PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN

El periodo de vibración (T_s) del suelo lo hallamos teniendo como base la velocidad de onda de corte promedio ($V_{S_{prom}}$) de los sondeos y el espesor del depósito de suelo (H):

$$T_s = \frac{4H}{V_{S_{prom}}}$$

Ecuación (22) Periodo fundamental de vibración

Debido a que los sondeos recopilados fueron realizados a profundidades relativamente pequeñas, el periodo de vibración de los depósitos de suelo da valores pequeños, porque solo evalúa estratos de suelo superficiales. Por consiguiente para obtener un resultado más óptimo utilizamos los datos de un ensayo SPT que se hizo a 25 metros de profundidad en el barrio de Getsemaní.

Hallamos la velocidad de onda de corte (V_s) de los sondeos del ensayo SPT, teniendo en cuenta la ecuación de Okamoto como hicimos con los anteriores sondeos.



Tabla 38. Velocidad de ondas de corte - sondeos de 25 m

| Carrera 8 B CL. 24 # 25-84 | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 1 | | | Sondeo 2 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 1 | 1,5 | 125,0 | 3 | 1,5 | 173,8 |
| 3 | 2,5 | 173,8 | 7 | 2,5 | 224,1 |
| 7 | 4,0 | 224,1 | 10 | 4,0 | 249,4 |
| 10 | 5,5 | 249,4 | 15 | 5,5 | 281,7 |
| 12 | 7,0 | 263,4 | 16 | 7,0 | 287,2 |
| 10 | 8,5 | 249,4 | 10 | 8,5 | 249,4 |
| 16 | 10,0 | 287,2 | 8 | 10,0 | 233,3 |
| 13 | 11,5 | 269,8 | 13 | 11,5 | 269,8 |
| 9 | 13,0 | 241,6 | 3 | 13,0 | 173,8 |
| 6 | 14,5 | 214,0 | 6 | 14,5 | 214,0 |
| 3 | 16,0 | 173,8 | 3 | 16,0 | 173,8 |
| 4 | 17,5 | 189,5 | 6 | 17,0 | 214,0 |
| 3 | 19,0 | 173,8 | 4 | 19,0 | 189,5 |
| 6 | 20,5 | 214,0 | 4 | 20,5 | 189,5 |
| 16 | 22,0 | 287,2 | 6 | 22,0 | 214,0 |
| 12 | 23,5 | 263,4 | 12 | 23,5 | 263,4 |
| 16 | 24,0 | 287,2 | 13 | 24,0 | 269,8 |
| 33 | 25,0 | 356,8 | 26 | 25,0 | 332,2 |

Fuente: Los autores

| Carrera 8 B CL. 24 # 25-84 | | | | | |
|----------------------------|-----------------|-------------------------|----------|-----------------|-------------------------|
| Sondeo 3 | | | Sondeo 4 | | |
| N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) | N | Profundidad (m) | Okamoto Velocidad (m/s) |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| 2 | 1,5 | 153,9 | 3 | 1,5 | 173,8 |
| 4 | 2,5 | 189,5 | 5 | 2,5 | 202,6 |
| 8 | 4,0 | 233,3 | 9 | 4,0 | 241,6 |
| 12 | 5,5 | 263,4 | 15 | 5,5 | 281,7 |
| 15 | 7,0 | 281,7 | 15 | 7,0 | 281,7 |



| | | | | | |
|----|------|-------|----|------|-------|
| 11 | 8,5 | 256,6 | 12 | 8,5 | 263,4 |
| 14 | 10,0 | 275,9 | 10 | 10,0 | 249,4 |
| 13 | 11,5 | 269,8 | 9 | 11,5 | 241,6 |
| 7 | 13,0 | 224,1 | 7 | 13,0 | 224,1 |
| 6 | 14,5 | 214,0 | 3 | 14,5 | 173,8 |
| 3 | 16,0 | 173,8 | 4 | 16,0 | 189,5 |
| 6 | 17,0 | 214,0 | 5 | 17,5 | 202,6 |
| 4 | 19,0 | 189,5 | 5 | 19,0 | 202,6 |
| 4 | 20,5 | 189,5 | 3 | 20,5 | 173,8 |
| 6 | 22,0 | 214,0 | 3 | 22,0 | 173,8 |
| 12 | 23,5 | 263,4 | 3 | 23,5 | 173,8 |
| 13 | 24,5 | 269,8 | 16 | 24,0 | 287,2 |
| 30 | 25,0 | 346,8 | 30 | 25,0 | 346,8 |

Fuente: Los autores

Luego hallamos la velocidad de onda de corte promedio ($V_{s\text{prom}}$), necesaria para poder hallar el periodo fundamental de vibración (T_s). Posteriormente comparamos el periodo fundamental de vibración hallado en cada sondeo y el promedio de estos.

Tabla 39. Periodo fundamental de vibración para sondeos de 25 m de profundidad

| | Sondeo 1 | Sondeo 2 | Sondeo 3 | Sondeo 4 |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| Vs promedio (m/s) | 235,74 | 233,47 | 234,60 | 226,87 |
| Profundidad (m) | 25 | 25 | 25 | 25 |
| Ts (s) | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,44 |
| Ts (s) promedio | 0,43 | | | |

Fuente: Los autores

Encontramos que el periodo fundamental de vibración promedio del suelo es de 0.43 segundos. Se tiene que evitar que las estructuras tengan iguales o parecidos periodos de vibración que el suelo, para que no entren en resonancia, y así no aumenten los efectos de los sismos en estas.



CONCLUSIONES

- Con base a la caracterización geotécnica de los sondeos, se presenta el siguiente perfil típico:
 - Desde la capa superficial hasta profundidades de 1.0 m, se encuentran rellenos de arena parda oscura con escombros.
 - En profundidades aproximadas de 1.0 a 2.0 m, se encuentra arena parda clara con densidad relativa suelta, NL NP, con rangos de humedad natural entre 6 – 9%, con porcentajes que pasan el tamiz N°4 entre 88 – 100%, con porcentajes que pasan el tamiz N°200 entre 5 – 45%.
 - Hasta la máxima profundidad, se encuentra arena limosa gris con densidad relativa mediana, NL NP, con rangos de humedad natural entre 10 – 13%, con porcentajes que pasan el tamiz N°4 entre 88 – 100%, con porcentajes que pasan el tamiz N°200 entre 5 – 45%.
- Según el análisis de datos de los ensayos de clasificación granulométrica y su clasificación en el S.U.C.S, encontramos que el suelo del sector de Getsemaní está



compuesto por estratos de arenas limosas (SM) y arenas limosas mal graduadas con pocos finos (SM-SP), con pesos unitarios entre $1.6 - 2.0 \text{ T/m}^3$.

- El sector de Getsemaní presenta depósitos de playón, que son acumulaciones arenosas con cierta concentración de grava de origen lítico (gravas de 0.5 a 2 cm) y biodetrítico (fragmentos de concha de 0.5 a 3 cm), representan antiguos niveles de playa. Además, su geomorfología presenta playones conformados por lóbulos arenosos con abundancia en fragmentos de concha.
- Utilizando el procedimiento simplificado, con base en el número de golpes de los ensayos STP, determinamos que la excitación sísmica de la capa de suelo expresada en términos de la relación de esfuerzos cíclicos promedios (CSR), no es mayor en ningún estrato que la capacidad del suelo para resistir la licuación en términos de la relación de resistencia de licuación, por lo tanto ninguno de los estratos evaluados es potencialmente licuable.
- De acuerdo a nuestra investigación bibliográfica, los suelos conformados por estratos de arena limosa y el nivel freático cercano a la superficie tienen altas probabilidades de ser potencialmente licuable, sin embargo al evaluar el potencial de licuación en los estratos del sector Getsemaní encontramos que estos no son potencialmente licuables.
- De acuerdo a los datos de la red sismológica, las magnitudes de sismos que más se han presentado en la zona, están entre 1 y 2,5 grados en la escala de Gutenberg-Richter, por consiguiente Cartagena se encuentra en una zona con bajo riesgo sísmico, al tener poca probabilidad de que ocurra un sismo de gran magnitud.



- La velocidad de onda de corte (V_s) juega un papel importante en la evaluación del comportamiento sísmico de los suelos, ya que por medio de esta podemos clasificar el suelo según la tabla A.2.4-1 de la norma sismo resistente (NSR-10), además permite hallar la velocidad de onda de compresión del suelo, el módulo de rigidez al esfuerzo cortante máximo y módulo dinámico, también por medio de esta se halla el periodo fundamental de vibración del suelo parámetro muy importante en el comportamiento sísmico.
- Partiendo de las velocidades de ondas de cuerpo, los parámetros obtenidos de módulos de elasticidad y módulo de rigidez el esfuerzo cortante se pueden utilizar para estimar la magnitud de asentamiento en suelos arenosos y comparar resultados con pruebas de campo.
- El periodo fundamental de vibración (T_s) es uno de los indicadores más usados y uno de los más importantes para evaluar el comportamiento sísmico del suelo, al ser sometido a sollicitaciones sísmicas, ya que cuando el suelo y la estructura tienen iguales o parecidos periodos fundamentales ocurre el fenómeno de resonancia, en el cual tanto el suelo como la estructura oscilan en forma sincronizada, causando que la estructura se vea sometida a mayores esfuerzos y desplazamientos. En este proyecto se encontró un valor aproximado a 0.43s.



- Para realizar un estudio óptimo del periodo fundamental de vibración del suelo se necesitan estudios de suelo con profundidades cercanas a los 30 metros de profundidad
- Para nosotros el mejor método de mitigación que se puede implementar en esta zona, es el método de inyecciones de compactación, ya que permite ser aplicado en obras ya existentes sin necesidad de modificar la estructura de la obra.



RECOMENDACIONES

A partir de la necesidad de mitigar los posibles daños causados por un sismo a la infraestructura de la zona, evaluamos algunas recomendaciones de prevención a futuros eventos sísmicos que podrían producirse en la zona de estudio.

OBRAS EXISTENTES

- a) Realizar estudios de vulnerabilidad sísmica en edificios de la zona, tomando como base el comportamiento sísmico evaluado.
- b) Mejoramiento del suelo por medio de inyecciones de compactación, ya que este método permite aplicarlo a obras existentes. Este método consiste en inyecciones de mortero seco lentamente, que se expande desplazando y compactando el terreno, forzando el aire y agua a salir produciendo que las partículas del suelo se reorganicen, de esta manera se incrementa la densidad relativa, la resistencia, la rigidez y se presenta una disminución en la permeabilidad¹⁸.
- c) En caso de ser necesario realizar intervenciones en la estructura, con el fin de corregir fallas y mejorar el comportamiento de la estructura a la hora de presentarse un fenómeno sísmico.

¹⁸ (Métodos de mejora de terrenos potencialmente licuables. Inyección de compactación.)



OBRAS NUEVAS

- a) Realizar estudios para determinar la velocidad de onda sísmica del perfil de suelo in situ, con el fin de dar resultados más acertados y disminuir variables.
- b) Evitar que las estructuras tengan iguales o parecidos periodos fundamentales de vibración (T_s) que el suelo, para así evitar que estos entren en resonancia y se amplifiquen los efectos del sismo teniendo en cuenta la Norma sismo resistente NSR-10.
- c) Mejoramiento de suelos por medio de los siguientes métodos:
 - **Compactación de impacto:** Consiste en dejar caer una masa usualmente de concreto o bloques de acero, desde una determinada altura y cierto número de caídas. Por lo general, el subsuelo por mejorar se considera constituido por tres capas; la más profunda es mejorada por la primera serie de apisonamientos, con un determinado número de repeticiones, con las mayores separaciones entre los puntos de impacto, y el nivel de energía más alto. La capa intermedia es mejorada por una segunda serie de apisonamientos, los impactos son localizados entre los impactos de la serie anterior y la altura de caída y las repeticiones son menores. La capa superficial es mejorada con apisonamientos con una altura de caída y una



separación pequeña e incluso se utiliza una masa menos pesada y más plana, con mayor superficie de contacto¹⁹.

- **Hincas de drenes:** Consiste en crear vías de salida de agua por medios de drenes, a través de esto se logra mayor consolidación en los estratos del suelo. Este método es fácil y rápido, y se puede complementar con otros métodos de mejoramiento de suelo para ser más efectivo²⁰.

- **Vibroflotación, vibrosustitución:** En este método se utiliza una sonda que produce vibraciones para penetrar el suelo, estas vibraciones causan que el suelo ceda y su estructura granular colapse, produciendo que el suelo se densifique y se reestructure.

A la combinación de vibroflotación con un agregado de gravas se le conoce como vibrosustitución, en este se forman columnas de piedras que mejoran la capacidad del drenaje del suelo, aumentando su densificación y su rigidez²¹.

¹⁹ (Análisis y mejoramiento de suelos potencialmente licuables, 2011)

²⁰ (Mejoramiento de suelos en base a los métodos de vibroflotación y vibrosustitución, 2008)

²¹ (Mejoramiento de suelos en base a los métodos de vibroflotación y vibrosustitución, 2008)



BIBLIOGRAFÍA

¿Perderá Cartagena su título de Patrimonio de la Humanidad? (2014). *Semana*.

Aguilar B, Z., Alva Hurtado, J., Ayquipa H., C., & Parra M, D. (1991). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN DE SUELOS EN LA CIUDAD DE MOYOBAMBA*. Lima, Perú.

Alegsa. (s.f.). *Los mejores destinos*. Obtenido de http://www.losmejoresdestinos.com/destinos/cartagena/cartagena_ubicacion.htm

Aponte González, J. A. (2011). *Evaluación de métodos no convencionales de caracterización geotécnica*. Bogotá, Colombia.

Bermudez Perez, S. M., & Bohorquez Marrugo, M. R. (2003). *Evaluación del potencial de licuación y comportamiento sísmico de los depósitos de playa en el casco urbano de Cartagena*. Cartagena.

Cano, C. (31 de Marzo de 2014). Obtenido de http://terremoycoiba.blogspot.com.co/2014/03/los-terremotos_31.html

Castillo, A. J. (2007). Correlación entre el valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de ondas de Corte para Arcillas en Bogotá - Colombia. *Épsilon*, 13-23.

Covo Torres , A. I. (2008). *Mecánica de suelos*. Cartagena, Colombia.

Dr. Obando, T. (2009). *Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a solicitaciones dinámicas*. Huelva, España.



- Errázuriz Blau, J. T. (2012). *Microzonificaciones sísmicas en ciudades del mundo y discusión sobre la aplicabilidad en la ciudad de Santiago*. Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Espectroscopia para caracterizar suelos expansivos. (2007). *Ciencias de la tierra y el simposio de teledetección, 2007. IGARSS 2007. IEEE* (págs. 1250-1254). Barcelona: IEEE.
- González Raynal, B. (s.f.). *Microzonificación sísmica y su utilización en la reducción del riesgo sísmico en cuba*. Centro nacional de investigaciones sismológicas, Ciudad de la habana.
- Huerta Cantera , H. E. (2010). *Determinación de propiedades físicas y químicas de suelos con mercurio en la región de San Joaquín, QRO., y su relación con el crecimiento bacteriano*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.
- Invias. (1994). *Cartografía básica I.G.A.C 1994 de aguas de Cartagena: Emisario submarino; ordenanza 04/1996: límite de distrito; planeación distrital: corregimiento; Invias: red vial principal, establecidos para la zona de estudio*. Cartagena.
- La distribución y caracterización de suelos expansivos en Mongolia. (2011). *Tecnología Estratégica (IFOST)*. 2, págs. 1327 – 1330. Harbin: IEEE.
- Lema, S. B. (s.f.). Métodos de mejora de terrenos potencialmente licuables. Inyección de compactación.
- Mendibure, L., & Narvaez, R. (14 de Noviembre de 2012). *Blogger.com*. Obtenido de <http://entiendelatierra.blogspot.com.co/2012/11/terminos-clasificar-la-actividad-escala.html>



- Mendoza, I. R. (2011). *Análisis y mejoramiento de suelos potencialmente licuables*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mora, M. A., Villalba, J. D., & Maldonado, E. (2006). Deficiencias, limitaciones, ventajas y desventajas de las metodologías de análisis sísmico no lineal. *Revista ingenierías universidad de Medellín*(9), 59-74.
- Ortega, C. A. (2008). *Mejoramiento de suelos en base a los métodos de vibroflotación y vibrosustitución*. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Ortiz Moscoso, M. (s.f.). *Medidas preventivas ante un terremoto o tsunami*. Universidad Arturo Prat del Estado de Chile.
- Pangeados. (2013). *Licuefacción, una consecuencia más de los grandes terremotos*. Obtenido de <http://www.pangeados.com/2013/01/licuefaccion-una-consecuencia-mas-de.html>
- Salgado, M., Bernal, G., Yanin, L., & Cardona, O. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería*(32), 28-37.
- Servicio geológico colombiano. (s.f.). Obtenido de <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/consultas/consulexp>
- Tavera, H. (s.f.). *Medidas de un terremoto*. Obtenido de <http://www.upv.es/dit/cefire/MedidasTerremoto.htm>
- Tomás, R., Cuenca, A., Delgado, J., & Doménech, C. (s.f.). *Diseño de un modelo geológico-geotécnico 3D de la vega baja del río segura (Alicante, se España)*. Alicante, España.



Trujillo P., C., Ospina Lopez, R., & Parra Lara, H. (Agosto de 2010). Los terremotos: Una amenaza natural latente. *Scientia Et Technica*, XVI(45), 303-308.

Viajeros.com. (s.f.). *Viajeros*. Obtenido de <http://www.viajeros.com/destinos/cartagena-de-indias/3-que-hacer/barrio-getsemani-cartagena>