

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO Y EVALUACIÓN
SÍSMICA EN EL SECTOR SAN PEDRO DEL CENTRO HISTORICO DE LA
CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C.**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



**Programa de
Ingeniería civil**
Fundado en 1949

IVAN FELIX AMADOR CANTILLO

JOSE BLAS ZULUAGA GONZALEZ

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C

2017

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO Y EVALUACIÓN
SÍSMICA EN EL SECTOR SAN PEDRO DEL CENTRO HISTORICO DE LA
CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C.**

Investigadores:

Iván Félix Amador Cantillo

José Blas Zuluaga González

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERIA CIVIL

Director:

Guilliam Barboza Miranda

Grupo de investigación:

GEOMAVIT

Línea de Investigación:

Geoamenazas

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del director
Guilliam Barboza Miranda

Firma del jurado
Modesto Barrios Fontalvo

Firma del jurado
Arnoldo Berrocal Olave

DEDICATORIA

En primera instancia, le dedico este logro a Dios porque gracias a su presencia en mí día a día he podido alcanzar este primer peldaño en mi vida profesional, a mis padres y mis hermanos por su apoyo y por alentarme constantemente a seguir mis metas. A la familia Urueta Púas, a los cuales los considero parte de mi familia, por la ayuda y el cariño brindado desde hace muchos años le dedico este logro a todos y de manera especial a Don Eder Rafael Urueta Díaz, quien sé que desde el cielo me observa y acompaña sonrientemente.

Ivan F. Amador Cantillo.

Agradezco a Dios debido a que él permitió que fuese posible alcanzar esta meta, a mi familia en especial a mi madre Levis González, mis tías Denis y Luz Zuluaga, y a la familia Villamizar Fernández por su apoyo durante este proceso de formación. A mi compañero de tesis Ivan Felix por los días de arduo trabajo dedicados al cumplimiento de esta meta en común.

José B. Zuluaga González.

Agradecemos al programa de ingeniería civil, a todos los docentes y administrativos que mediante el ejercicio de su labor permitieron nuestro crecimiento tanto personal como profesional, una mención especial al ingeniero Guillian Barboza Miranda por ser nuestro director de proyecto de grado y por sus enseñanzas durante el transcurso de esta carrera.

Mil gracias a todas las demás personas que de una u otra manera aportaron e hicieron posible la consecución de este título.

TABLA DE CONTENIDO

1.	MARCO REFERENCIAL	6
1.1	MARCO TEÓRICO.....	6
1.1.1	Propiedades físicas del suelo.....	6
1.1.2	Textura	6
1.1.3	Porosidad del suelo.....	6
1.1.4	Estructura del suelo	7
1.1.5	Consistencia del suelo	7
1.1.6	Resistencia de los suelos al esfuerzo cortante	8
1.1.7	Resistencia a la penetración	8
1.1.8	Color del suelo	8
1.1.9	Clasificación de Suelos	8
1.1.10	Terremoto.....	9
1.1.11	Escala de Richter.....	9
1.1.12	Escala de Mercalli.	10
1.1.13	Licuación.....	10
1.1.14	Procedimiento Simplificado de Seed e Idriss.....	10
1.1.15	Métodos de Kishida (1969) y Ohsaki (1970).....	10
1.1.16	Ensayo SPT	11
1.1.17	Relación de Resistencia Cíclica (CRR).....	11
1.1.18	Relación de tensiones cíclicas (CSR).....	11
1.1.19	Velocidad de onda de corte (V_s).....	11
1.2	ESTADO DEL ARTE.....	12
1.2.1	Antecedentes nacionales	12
1.2.2	Antecedentes internacionales	15
2.	JUSTIFICACION.....	17
3.	OBJETIVOS	19
3.1	OBJETIVO GENERAL	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4.	ALCANCES.....	20

4.1	DELIMITACIÓN ESPACIAL.....	20
4.2	DELIMITACIÓN TEMPORAL.....	21
4.3	DELIMITACIÓN CONCEPTUAL.....	21
4.4	RESULTADOS.....	21
4.5	LIMITACIONES.....	21
5.	METODOLOGÍA.....	22
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	25
6.1	LISTA DE SONDEOS REGISTRADOS.....	25
6.2	UBICACIÓN DE LOS SONDEOS.....	25
6.3	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA.....	27
6.4	TABLAS RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SONDEOS DOCUMENTADOS.....	29
6.5	MODELO GEOLOGICO-GEOTECNICO.....	37
6.5.1	Perfiles modelo geológico-geotécnico.....	39
6.5.2	Planos topográficos de la zona.....	44
6.6	EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN.....	48
6.6.1	Resultados.....	52
6.7	COMPORTAMIENTO SÍSMICO.....	53
6.8	VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (VS).....	59
6.8.1	Velocidad de onda de corte de los perfiles.....	60
6.9	CLASIFICACIÓN DEL PERFIL DE SUELO.....	63
6.10	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.....	64
6.11	SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LAS CASAS COLONIALES.....	67
6.11.1	Periodo fundamental de vibración promedio de las casas del sector.....	68
7.	CONCLUSIONES.....	70
8.	RECOMENDACIONES.....	73
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	74
10.	ANEXOS.....	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de sondeos ejecutados en el sector.	25
Tabla 2. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 1.	29
Tabla 3. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 2.	29
Tabla 4. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 3.	30
Tabla 5. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 4.	30
Tabla 6. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 5.	31
Tabla 7. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 6.	32
Tabla 8. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 7.	32
Tabla 9. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 8.	33
Tabla 10. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 9.	33
Tabla 11. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 10.	34
Tabla 12. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 11.	34
Tabla 13. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 12.	35
Tabla 14. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 13.	36
Tabla 15. Formato guía para evaluar el potencial de licuefacción.	48
Tabla 16. Pesos unitarios en función del número de golpes.	49
Tabla 17. Factores para corrección por equipos.	51
Tabla 18. Cantidad de sismos por magnitud. Fuente: Autores.	55
Tabla 19. Frecuencia sísmica acumulada.	56
Tabla 20. Tabulación de frecuencia sísmica según Intervalos de magnitudes.	57
Tabla 21. Correlaciones para determinar la velocidad de onda de corte.	59
Tabla 22. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 1.	60
Tabla 23. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 2.	61
Tabla 24. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 3.	61
Tabla 25. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 4.	62
Tabla 26. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 5.	62
Tabla 27. Clasificación del perfil de suelo.	63
Tabla 28. Resumen de los sondeos utilizados para determinar el Ts.	65
Tabla 29. Periodo fundamental de vibración para sondeos de mayores profundidades.	66
Tabla 30. Tabla A.4.2-1 (Valor de los parámetros C_t y α para el cálculo del período aproximado T_a)	69
Tabla 31. Periodos fundamentales de vibración para alturas comunes en el sector.	69
Tabla 32. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S1.	77
Tabla 33. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S2.	78
Tabla 34. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S3.	78
Tabla 35. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S4.	78
Tabla 36. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S5.	78
Tabla 37. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S6.	78

Tabla 38. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S7	78
Tabla 39. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S8	78
Tabla 40. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S9.....	78
Tabla 41. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S10	78
Tabla 42. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S11	78
Tabla 43. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S12	78
Tabla 44. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S13	78

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación geográfica zona de estudio - Cartagena, Colombia.	20
Ilustración 2. Esquema metodología	22
Ilustración 3. Delimitación del sector San Pedro en el centro histórico- Cartagena. Modificado por autores con ubicación de sondeos	26
Ilustración 4. Formato de descripción de sondeos	27
Ilustración 5. Correspondiente al modelo geológico-geotécnico.	37
Ilustración 6. Perfil 1 del modelo geológico-geotécnico.....	39
Ilustración 7. Perfil 2 del modelo geológico-geotécnico.....	40
Ilustración 8. Perfil 3 del modelo geológico-geotécnico.....	41
Ilustración 9. Perfil 4 del modelo geológico-geotécnico.....	42
Ilustración 10. Perfil 5 del modelo geológico-geotécnico.....	43
Ilustración 11. Plano general de la zona de estudio.	44
Ilustración 12. Plano topográfico de la profundidad de escombros encontrados.	45
Ilustración 13. Plano topográfico del nivel freático de la zona de estudio.	46
Ilustración 14. Plano topográfico según profundidad de las arenas blandas.	47
Ilustración 15. Consulta experta RSNC.	53
Ilustración 16. Sismos presentados en un radio de 100 Km del sector en estudio entre 1993 y 2017.	54

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Módulo de elasticidad	28
Ecuación 2. Coeficiente de uniformidad.....	28
Ecuación 3. Angulo de fricción interna.....	28
Ecuación 4. Peso unitario seco	28
Ecuación 5. Peso unitario del suelo húmedo.....	28
Ecuación 6. Presión de poros	50
Ecuación 7. Esfuerzo vertical total.....	50
Ecuación 8. Esfuerzo vertical total.....	50
Ecuación 9. Factor de reducción de esfuerzo.....	50
Ecuación 10. Relación de los esfuerzos cortantes cíclicos.....	50
Ecuación 11. Corrección por presión de confinamiento.....	51
Ecuación 12. Corrección por contenido de finos.....	51
Ecuación 13. Numero de golpes corregido.....	51
Ecuación 14. Coeficiente de resistencia cíclica.....	52
Ecuación 15. Corrección por plasticidad.....	52
Ecuación 16. Requisitos de licuefacción.....	52
Ecuación 17. Ecuación de Okamoto et al. (1989).....	59
Ecuación 18. Periodo fundamental de vibración.....	64
Ecuación 19. Ecuación A.4.2-3. Periodo fundamental de vibración aproximado.....	68

INDICE DE GRAFICOS

Gráfica 1. Magnitud vs frecuencia sísmica.	56
Gráfica 2. Rango de magnitudes vs Frecuencia sísmica	57
Gráfica 3. Frecuencia sísmica vs Año de ocurrencia.	58
Gráfica 4. Fronteras de licuefacción Sondeo S1	77
Gráfica 5. Fronteras de licuefacción Sondeo S2	78
Gráfica 6. Fronteras de licuefacción Sondeo S3	78
Gráfica 7. Fronteras de licuefacción Sondeo S4	78
Gráfica 8. Fronteras de licuefacción Sondeo S5	78
Gráfica 9. Fronteras de licuefacción Sondeo S6	78
Gráfica 10. Fronteras de licuefacción Sondeo S7	78
Gráfica 11. Fronteras de licuefacción Sondeo S8	78
Gráfica 12. Fronteras de licuefacción Sondeo S9	78
Gráfica 13. Fronteras de licuefacción Sondeo S10	78
Gráfica 14. Fronteras de licuefacción Sondeo S11	78
Gráfica 15. Fronteras de licuefacción Sondeo S12	78
Gráfica 16. Fronteras de licuefacción Sondeo S13	78

RESUMEN

A medida del transcurrir de los años, debido a la creciente actividad sísmica registrada en múltiples lugares del mundo, se ha acentuado la importancia de la realización de estudios que permitan determinar la composición de las capas de suelos y su susceptibilidad ante fenómenos de licuefacción, entre otros fenómenos que comprometan la vida y/o estabilidad de una región.

Este estudio se orientó a realizar la caracterización geotécnica del sub suelo del sector de San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena, con el objetivo de analizar el comportamiento sísmico y susceptibilidad a la licuefacción de la zona y consecuentemente proponer soluciones o recomendaciones en pro de la conservación de la vida y el patrimonio histórico y cultural de Cartagena.

En la ejecución de este proyecto se compiló información acerca de sondeos, registros de perforaciones y estudios de suelo existentes en la zona bajo la autoría de ingenieros geotecnistas experimentados. Se analizó dicha información y posteriormente se realizó una caracterización geotécnica del sub suelo, luego se elaboró un modelo geológico-geotécnico tomando como base la caracterización geotécnica previamente elaborada. Además se evaluó el potencial de licuación de la zona con la ayuda del método de Kishida y Ohsaki, teniendo en cuenta el número de golpes en el suelo que proporcionado por medio de los ensayos SPT de los sondeos previamente recopilados. Consecuentemente, se halló la velocidad de onda de corte del suelo de los diferentes sondeos, a partir de la cual se determinó el periodo fundamental de vibración del suelo del sector San Pedro para compararlo con el periodo fundamental aproximado de las estructuras, calculado tentativamente a partir de las alturas promedio de las casas coloniales y la clasificación del sistema estructural según la NSR-10. En términos generales, el estudio arrojó como resultado que Cartagena no es una ciudad con gran actividad sísmica, también se evidenció que la zona de estudio se encuentra compuesta en su mayoría por estratos de suelos arenosos y no es propensa a la licuefacción, además indica que las casas coloniales típicas del sector no se encuentran expuestas a la resonancia.

ABSTRACT

In proportion to to pass of the years, due to the increasing seismic activity registered in multiple places of the world, there has been accentuated the importance of the accomplishment of studies that allow to determine the composition of the caps of soils and his susceptibility before phenomena of liquefaction, between other phenomena that compromise the life and / or stability of a region.

This study was orientated to the geotechnical characterization of the sub realize soil of San Pedro sector of the historical center of the city of Cartagena, with the aim to analyze the seismic behavior and susceptibility to the liquefaction of the zone and consistently to propose solutions or recommendations in favor of the conservation of the life and the historical and cultural heritage of Cartagena.

In the execution of this project information was compiled it brings over of polls, records of perforations and existing studies of soil in the zone under the engineers' authorship geotechnical experienced. The above mentioned information was analyzed and later a geotechnical characterization of the sub was realized I occur, then a geological - geotechnical model was elaborated taking as a base the geotechnical before elaborated characterization. In addition there was evaluated the potential of liquefaction of the zone by the help of the method of Kishida and Ohsaki, Bearing the number of blows in mind in the soil that provided by means of the tests SPT of the before compiled polls. Consistently, there was situated the wave speed of court of the soil of the different polls, from which San Pedro decided the fundamental period of vibration of the soil of the sector to compare it with the fundamental approximate period of the structures, calculated tentatively from the heights I mediate of the colonial houses and the classification of the structural system according to the NSR-10. In general terms, the study threw as result that Cartagena is not a city with great seismic activity, also there was demonstrated that the zone of study is composed in the main by strata of sandy soils and is not inclined to the liquefaction, in addition it indicates that the colonial typical houses of the sector are not exposed to the resonance.

INTRODUCCION

Cartagena de Indias es conocida internacionalmente como una de las ciudades coloniales más atractivas para los turistas debido a que posee en su “Corralito de piedra” casas con arquitectura de tipo colonial, plazas y calles que conservan además de su belleza, nombres particulares producto de la riqueza de historias que desde la llegada de la corona española sobre el nuevo mundo han hecho de ella su escenario. Tales características sumadas a la presencia de unas de las murallas mejor conservadas del mundo le ha valido para ser proclamada patrimonio histórico y cultural por la UNESCO, estableciéndose como el primer lugar colombiano en entrar a formar parte de la Lista del Patrimonio Mundial Cultural y Natural con la denominación de “Puerto, Fortaleza y Conjunto Monumental de Cartagena” (UNESCO, 1984).

Ante tal importancia de la ciudad para los visitantes y lugareños, y con la necesidad de conservar el valor histórico del sector amurallado, es conveniente llevar a cabo estudios que permitan prolongar esta herencia, llevando así a su mínima expresión las afecciones que puedan caer sobre ella. Los resultados catastróficos que los fenómenos naturales pueden llegar a ocasionar sobre la infraestructura, las edificaciones y la población en zonas urbanas, son unos de los acontecimientos más impactantes a los que el hombre le ha tocado hacer frente desde la antigüedad, y es ahí donde la evaluación del riesgo es el primer paso para su prevención, gestión y disminución (Lantada Zarsosa, 2007). Seguidamente, al contemplar que Cartagena hace parte de Colombia, y que de esta se considera que de su población: “... el 86% está expuesto a una amenaza sísmica alta y media, el 28% a un alto potencial de inundación y el 31% a una amenaza alta y media por movimientos en masa...” (BANCO MUNDIAL, 2012), se hace necesaria la implementación de estudios preventivos que ayuden a proteger a la gente, edificaciones e infraestructura de posibles daños. He aquí donde se hace esencial entre otras cosas los análisis de los suelos, donde saber su composición y comportamiento sísmico es de gran importancia al momento de prevenir daños de esta índole, de tal forma que se vuelve una necesidad el cálculo de parámetros como la capacidad de licuefacción del terreno ya que es un factor determinante si se desea revelar conclusiones relevantes.

Al referirse sobre el reglamento sismo resistente vigente en Colombia (NSR-10) se puede observar a la ciudad de Cartagena en una zona de amenaza sísmica baja, en concordancia con lo anterior, se encuentra en los registros históricos de sismos que el de mayor magnitud se presentó en el año 1975 y su magnitud fue de 6,1 en la escala de Richter y el más reciente se exhibió en el año 1998 con una magnitud de 5,3 (Calvo M, 2011), a pesar de la baja amenaza y poca frecuencia sísmica en la ciudad de Cartagena, es importante realizar distintos estudios que permitan identificar que tan susceptible y preparada esta la ciudad ante la presencia de un movimiento telúrico

El sector de San Pedro que es el objeto de estudio, está ubicado en una zona caracterizada por ser un suelo de depósitos de playa (INGEOMINAS, 2000), lo cual lo hace propenso a los fenómenos de licuación al presentarse movimientos telúricos, perdiendo así el suelo su estabilidad y resistencia al esfuerzo cortante, debido al aumento de la presión de poros (Quesada, 2008).

Debido a lo anterior y a que *“Cartagena patrimonio cultural de la humanidad, carece de un estudio de caracterización geotécnica del sub-suelo y su evaluación sísmica, y sus efectos sobre un lugar como el centro histórico de la ciudad, que dada su importancia debería tenerse en cuenta ante un posible evento sísmico...”* (Torral, 2016), se realizó por medio de esta investigación una caracterización geotécnica, una evaluación del potencial de licuación de la zona y una descripción de los tipos de sistemas constructivos comunes en el sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena, con el fin de tener una visión general del comportamiento dinámico de este, calculando valores promedios de velocidad de onda de corte y periodo fundamental, comparándolo con el periodo aproximado (T_a) de las edificaciones. Además se presentaron una serie de recomendaciones que contribuyan a la preservación del patrimonio histórico y cultural de Cartagena y que permitan evitar o disminuir posibles perjuicios a la población cartagenera y/o visitantes.

Este trabajo de grado sirve como base si en un futuro se desea realizar una microzonificación para obtener una visión general del comportamiento del subsuelo en el centro histórico de la ciudad de Cartagena de indias.

Siguiendo el orden de ideas anteriormente planteadas y tomando la iniciativa con respecto al desarrollo de la investigación, se plantearon las siguientes preguntas:

¿Cuál es el comportamiento sísmico del subsuelo en el sector San Pedro del centro de la ciudad de Cartagena?

¿Qué tan licuable es el subsuelo de la zona en estudio?

¿Cuáles son los sistemas constructivos y los tipos de cimentaciones característicos de las edificaciones de tipo colonial en el sector san pedro?

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEÓRICO.

1.1.1 Propiedades físicas del suelo.

Las propiedades físicas de los suelos, determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos a los que el hombre los sujeta. La condición física de un suelo, determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.2 Textura

La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.3 Porosidad del suelo

La porosidad, se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros. O lo que es lo mismo, el porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos.

La porosidad total se determina directamente, en muestras de suelo imperturbadas, es decir tal como están en el campo, sin ninguna deformación que altere la ubicación de las partículas sólidas, y por lo tanto los espacios que dejan entre ellas (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.4 Estructura del suelo

Se la define como el arreglo de las partículas del suelo. Se debe entender por partículas, no solo las que fueron definidas como fracciones granulométricas (arena, arcilla y limo), sino también los agregados o elementos estructurales que se forman por la agregación de las fracciones granulométricas. Por lo tanto, «partícula» designa a toda unidad componente del suelo, ya sea primaria (arena, limo, arcilla) o secundaria (agregado o unidad estructural). El arreglo entre las partículas del suelo, la estructura, determina el espacio entre las mismas, que son predominantemente macroporosos. Según el nivel de observación, se puede hablar de macroestructura o microestructura. La macroestructura, es el arreglo de las partículas secundarias y primarias visibles a simple vista. La microestructura es el arreglo de las partículas primarias para formar las secundarias; de ella depende en alto grado la macroestructura. Al atender a la microestructura, se observa que los componentes coloidales del suelo (plasma) actúan como cemento de los granos más gruesos (esqueleto) (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.5 Consistencia del suelo

Usualmente definida como el término que designa las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión, actuando dentro del suelo a varios contenidos de humedad. Estas manifestaciones incluyen:

- a) El comportamiento con respecto a la gravedad, presión y tensión.
- b) La tendencia de la masa del suelo de adhesión a cuerpos extraños o sustancias.
- c) Las sensaciones que son evidenciadas y sentidas por los dedos del observador.

Esta definición implica que el concepto de consistencia del suelo incluye algunas propiedades del suelo, como resistencia a la compresión, friabilidad, plasticidad, viscosidad (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.6 Resistencia de los suelos al esfuerzo cortante

La resistencia del suelo a la cortadura es la resistencia interna máxima del suelo al movimiento de sus partículas (o sea la resistencia al deslizamiento del suelo sobre el suelo) (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.7 Resistencia a la penetración

La resistencia de un suelo a la penetración de un instrumento de sondeo, es un índice integrado de la compactación de suelo, contenido de humedad, textura y tipo de arcilla. Es un índice de resistencia del suelo. Es una determinación que implica a la consistencia y estructura del suelo. El instrumento usado para determinarla se denomina penetrógrafo y mide la fuerza necesaria para penetrar el suelo con una sonda (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.8 Color del suelo

El color es un carácter del suelo, fácil de observar y de uso cómodo para identificar un tipo de suelo dentro del cuadro regional o local. Generalmente está en relación con los procesos de pedogénesis o con uno de los factores de formación. Pero, por una parte, el proceso que colorea el suelo no es siempre fundamental, y por otra parte, la misma coloración, o matices vecinos bien pueden resultar de causas diferentes. Es así que ese carácter debe ser utilizado con circunspección y sabiendo que raramente tiene valor como criterio de clasificación al nivel de los grandes tipos de suelos (Universidad de la Republica, 2004).

1.1.9 Clasificación de Suelos

Se refiere a la agrupación con un rango de propiedades similares (químicas, físicas y biológicas) a unidades que puedan ser geo-referenciadas y mapeadas. De hecho, los suelos se consideran como un recurso natural mucho más complejo que otros elementos como el aire y el agua (FAO, Clasificación de Suelos, s.f.).

Los suelos por su naturaleza contienen elementos químicos y simultáneamente se combinan entre fases sólidas, líquidas y gaseosas. Además el número de características físicas, químicas y biológicas y sus combinaciones llegan a ser casi infinitas. Asimismo no es de extrañar las varias propuestas y esquemas distintos para armonizar y correlacionar los tipos de suelo diferente (FAO, Clasificación de Suelos, s.f.).

1.1.10 Terremoto

Un terremoto se define como un movimiento o una serie de movimientos transitorios y repentinos del terreno, que se propaga desde su origen en todas las direcciones. La mayoría de los terremotos suelen suceder en forma de grupos estrechamente relacionados, en el tiempo y en el espacio. La energía liberada durante la ocurrencia de un terremoto se propaga en forma de ondas entre las cuales podemos mencionar las ondas P (primarias) y ondas S (secundarias) (Centro de Sismología Universidad de Oriente, 2012).

1.1.11 Escala de Richter

Aunque hay varias medidas para representar la potencia de los terremotos en todo el mundo, una de las más habituales es la magnitud de Richter. Esta se obtiene a partir de un tipo de onda superficial que se produce en los terremotos y al aplicar una escala logarítmica, de modo que cada unidad de magnitud de Richter corresponde a un aumento de la energía de 32 veces: es decir, un terremoto de magnitud 4 en la escala de Richter libera 32 veces más energía que uno de magnitud 3, aproximadamente (LÓPEZ SÁNCHEZ, 2015).

1.1.12 Escala de Mercalli.

Escala cualitativa de intensidad que describe la percepción subjetiva de las personas ante un sismo en un lugar específico. Consta de 12 grados medidos en números romanos desde el I al XII. Está relacionada con el daño observado en el lugar (Valenzuela, 2006).

1.1.13 Licuación

La licuación es un fenómeno que ocurre mayormente en terrenos arenosos sueltos, saturados, como consecuencia de un sismo. Las vibraciones sísmicas producen un esfuerzo cortante de la masa de suelo que a su vez genera un incremento de la presión del agua en los poros, debido a la dilatancia de los materiales. El aumento en la presión de poro implica una reducción del esfuerzo efectivo (Quesada, 2008).

1.1.14 Procedimiento Simplificado de Seed e Idriss.

De acuerdo con el trabajo de Seed e Idriss (1971), las cargas sísmicas se aplican a la muestra de laboratorio mediante una aproximación en términos de las tensiones de corte cíclicas. Dicha aproximación que se hace al describir las cargas como tensiones de corte cíclicas equivalentes a las inducidas por un terremoto (y la evaluación subsiguiente de las tensiones de corte cíclicas equivalentes requeridas para causar la licuación) se ha conocido extensamente como el *procedimiento simplificado* (Collarte & Poblete, 2004).

1.1.15 Métodos de Kishida (1969) y Ohsaki (1970)

Estas técnicas están basadas en el número de golpes suministrados al terreno mediante ensayos tipo SPT, cuyos resultados son empleados en el análisis de las condiciones de los suelos ante sollicitaciones sísmicas, capaces de generar la licuación del terreno, tal y como ocurrió en el año 1964 en la Ciudad de Niigata (Japón) (Obando, 2009).

1.1.16 Ensayo SPT

El ensayo SPT se realiza en el interior de sondeos durante la perforación, consiste básicamente en contar el número de golpes (N) que se necesitan para introducir dentro de un estrato de suelo, un toma muestras (cuchara partida hueca y cilíndrica) de 30 cm de largo, diámetro exterior de 51mm e interior 35mm, que permite realizar tomas de muestra naturalmente alterada en su interior, a diferentes profundidades (generalmente con variación de metro en metro) (ASTM D 1586).

1.1.17 Relación de Resistencia Cíclica (CRR)

La razón de resistencia cíclica CRR expresa la capacidad del suelo para resistir la licuefacción (Leoni, S.F).

1.1.18 Relación de tensiones cíclicas (CSR)

Parámetro de caracterización pseudo empírica de las sollicitaciones generadas por el sismo en el perfil de terreno (UNC, S.F).

1.1.19 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 o 5) evaluar la alteración de una muestra (Stokoe K.H. II, 1989).

1.2 ESTADO DEL ARTE

Debido a la importancia que tiene para el sector ingenieril y ramas afines estar al tanto del comportamiento del subsuelo para poder evitar desastres naturales, problemas estructurales en edificaciones, entre otros, es necesario hacer una serie de estudios que permitan presentar información detallada acerca de estos fenómenos que pueden afectar las estructuras durante la presencia de un sismo. Uno de los principales fenómenos es la licuefacción, este se genera principalmente en suelos arenosos y arena limosos saturados en agua, usualmente ubicados cerca de ríos, borde costero u otros cuerpos de agua, o bien, en aquellos suelos donde existe un nivel freático muy superficial (Alfaro, 2013) como consecuencia de un sismo. Las vibraciones sísmicas producen un esfuerzo cortante de la masa de suelo que a su vez genera un incremento de la presión del agua en los poros, debido a la dilatancia de los materiales. El aumento en la presión de poro implica una reducción del esfuerzo efectivo, lo cual genera inestabilidad en el subsuelo (Quesada, 2008).

A continuación se evidenciarán proyectos que harán referencia a los antecedentes de estudios que se han hecho acerca del tema en cuestión.

1.2.1 Antecedentes nacionales

1.2.1.1 Evaluación del potencial de licuación por medio del ensayo triaxial cíclico de un suelo en la sabana de Bogotá. (David Castañeda, Jesica Romero, 2016).

En el año 2016 en la ciudad de Bogotá se presentó un proyecto titulado “Evaluación del potencial de licuación por medio del ensayo triaxial cíclico de un suelo en la sabana de Bogotá”, a cargo de David Castañeda y Jessica Romero, el cual tenía como objetivo

analizar el comportamiento de suelos granulares saturados ante la presencia de cargas dinámicas, bajo el fenómeno de licuación a través de un equipo Triaxial Cíclico.

Se determinó según los resultados de los sondeos que el suelo no tiene un potencial de licuación alto, lo que concuerda con las máximas deformaciones calculadas en los ensayos triaxiales cíclicos.

1.2.1.2 Caracterización geotécnica del subsuelo y evaluación sísmica en el sector

Getsemaní en la ciudad de Cartagena de indias. (Darwin escorcia y Jesus herrera, 2016).

En el año 2017 en la ciudad de Cartagena, se realizó un proyecto de grado titulado “Caracterización geotécnica del subsuelo y evaluación sísmica en el sector Getsemaní en la ciudad de Cartagena de indias” por los ingenieros Darwin Escorcia y Jesús Herrera, utilizando la metodología de Kishida y Ohsaki (1969 y 1970) y el método de Seed et al (1983) con el fin de caracterizar geotécnicamente el subsuelo del sector Getsemaní teniendo en cuenta el comportamiento dinámico con base en la obtención de estudios geotécnicos practicados en la zona y así evaluar el potencial de licuación, evaluar el comportamiento sísmico y elaborar un modelo geológico-geotécnico del lugar en cuestión.

Este estudio fue realizado por medio de la obtención de distintos estudios realizados en la zona, y se pudo concluir que el subsuelo en el sector Getsemaní es prácticamente arcilloso y por lo tanto dicho material en la zona es potencialmente licuable por lo que las estructuras en este sector son vulnerables si ocurre un sismo de 4 grados o más en la escala de Richter.

Los autores exponen que la investigación no cubre un estudio de suelo que permita realizar una microzonificación sísmica ya que esto supondría una asociación con entidades públicas y/o privadas que puedan cubrir los gastos del estudio completo. Además es un proyecto de carácter investigativo.

1.2.1.3 Evaluación del potencial de licuación y comportamiento sísmico de los depósitos de playa en el casco urbano de Cartagena. (Sujey Bermúdez y Martín Bohórquez, 2003).

En el año 2003 en la ciudad de Cartagena se realizó un estudio denominado “Evaluación del potencial de licuación y comportamiento sísmico de los depósitos de playa en el casco urbano de Cartagena” por los ingenieros Sujey Bermúdez y Martín Bohórquez, el cual utilizó la metodología simplificada de Seed e Idriss para identificar el potencial de licuación en el casco urbano de la ciudad de Cartagena (sectores de: Bocagrande, Marbella, El laguito, Crespo, Castillogrande, El Cabrero, Centro, Manga y Pie de la Popa).K

El estudio determinó que tan vulnerable o susceptible es el subsuelo de la zona de estudio ante el fenómeno de la licuación, además de identificar el comportamiento sísmico de los depósitos de playa en el casco urbano de Cartagena, con el fin de dar una serie de recomendaciones que permitan mitigar este problema.

1.2.1.4 Caracterización geotécnica del sub-suelo que constituyen el centro histórico de la ciudad de Cartagena y evaluación de su comportamiento sísmico, sector san diego. (Javier Toral, 2016).

En el año 2016 en la ciudad de Cartagena, se presentó un trabajo de grado denominado “Caracterización geotécnica del sub-suelo que constituyen el centro histórico de la ciudad de Cartagena y evaluación de su comportamiento sísmico, sector san diego”, a cargo del ingeniero Javier Toral. Este trabajo consistió en realizar una descripción del suelo del sector y el comportamiento sísmico de este, mediante la recopilación de información de estudios de suelos ya realizados, y la determinación del potencial de licuación y la velocidad de onda de sismo según el método chino de Okamoto.

1.2.2 Antecedentes internacionales

1.2.2.1 Caracterización geológico-geotécnica del subsuelo urbano de Navia. (Adán Lanza García, 2015).

Este estudio realizado en España, titulado “Caracterización geológico-geotécnica del subsuelo urbano de Navia” a nombre de Adán Lanza García, utilizó la metodología de adquisición y análisis de información, recolectando alrededor de 354 parámetros geotécnicos por medio de ensayos como el de penetración estándar, penetración dinámica, calicatas entre otros. Con el fin de crear una base de datos digital gracias a estas investigaciones, georreferenciándolas para poder integrarlas en un sistema de información geográfica por medio de una estructura *geodatabase* y de esta forma poder interpretar las propiedades geológico-geotécnicas del subsuelo de Navia.

1.2.2.2 Determinación del potencial de licuación con el método de microtremores. (Vanessa Mussio, Efraín Ovando, miguel Rodríguez y Jesús Chang, 2012).

En el año 2012 en México, se llevó a cabo Este estudio titulado “Determinación del potencial de licuación con el método de microtremores” a cargo de Vanessa Mussio, Efraín Ovando, miguel Rodríguez y Jesús Chang, en el cual tenía como objetivo principal estimar el potencial de licuación de un ambiente urbano mediante el uso del método sísmico de microtremores, utilizando la dispersión de la velocidad de fase de las ondas de Corte.

A partir de los registros de microtremores de la zona de estudio que obtuvieron los autores, desarrollaron un procedimiento para modelar y evaluar los perfiles de la velocidad de onda de corte (V_s) en el que tuvieron en cuenta toda la información geológica y geotécnica del lugar como lo fueron los datos de seis (06) sondeos de penetración estándar realizados en la zona. Una vez determinado el perfil de velocidad de la onda de corte, se recurrió a determinar el potencial de licuación mediante criterios ya conocidos.

1.2.2.3 Evaluación del potencial de licuación de suelos en la ciudad de Moyobamba.
(Denys Parra, Zenón Aguilar, Carmen Ayquipa y Jorge Alva).

En la ciudad de Moyobamba (Perú), se realizó un estudio el cual tenía como objetivo identificar y analizar las zonas susceptibles a presentar el fenómeno de la licuación en la ciudad en cuestión. La metodología utilizada para determinar el potencial de licuefacción fue la simplificada, para esto fue necesario recopilar estudios ya ejecutados que brindaron información importante para la ejecución del estudio, además de ejecutar ensayos como calicatas y sondajes de exploración de suelos como ensayos de penetración estándar y cono holandés.

A partir del sismo de diseño y la aceleración máxima en el sitio se determinó el potencial de licuación en distintos sitios de la zona y se evidenció coincidencia de ocurrencia del fenómeno de licuación en lugares vulnerables.

1.2.2.4 Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. (Daniel Santibáñez, 2006).

En el año 2006 en la ciudad de Valdivia (Chile), se ejecutó un proyecto titulado “Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar”, en esta trabajo de grado se analizó en detalle el potencial de licuefacción en los suelos granulares saturados, cuando son propensos a sismos, mediante el método simplificado de Seed e Idriss. También se desarrolló un software basado en dicho método, Este programa funciona simulando las condiciones del problema y el valor de la resistencia a la penetración estándar, para así determinar rápidamente el potencial de licuefacción de un suelo.

2. JUSTIFICACION

En concordancia con los registros históricos del Servicio Geológico Colombiano (SGC), Cartagena de indias se encuentra en una zona de amenaza sísmica baja en comparación con otras zonas del país, pero aunque la actividad sísmica de la región Caribe no es habitual, esto no implica que sea inexistente o que eventos ocurridos en sectores aledaños no sean perceptibles en la ciudad amurallada. Como prueba de ello la red sismológica nacional registró en 1975 el mayor sismo en Cartagena con 6.1 grados en la escala de Richter, otro en 1998 con una intensidad de 5.7 en la escala de Richter y otros más recientes con intensidades menores; Además se reconoció en 2015 un terremoto de 6.6 grados- en la escala de Richter con epicentro en Los Santos-Santander, siendo perceptible en la escala sismológica de Mercalli en los departamentos de Bolívar (IV), Atlántico (IV), Sucre (IV), entre otros (RSNC, s.f.). Estos datos comprueban que Cartagena no se encuentra exenta de daños productos de movimientos sísmicos, de tal forma que la evaluación de la composición del sub-suelo es de gran ayuda al momento de determinar la propensión a fenómenos de licuefacción producidos por los sismos que desencadenen daños a las estructuras, así como el cálculo del comportamiento dinámico tomando parámetros como la velocidad de onda de corte y el periodo de vibración del suelo que permitan hacer relación con las edificaciones propias de la zona.

Como consecuencia a lo anterior se justifica la realización de estudios que permitan conocer el comportamiento del subsuelo en el centro histórico y poder tomar medidas correctivas o en su defecto establecer recomendaciones para las posibles restauraciones o rehabilitaciones en las edificaciones existentes. En favor de conservar la arquitectura colonial y distintos monumentos históricos que le dan distinción de Patrimonio Histórico y Cultural de la Humanidad a la ciudad de Cartagena, baúl de grandes historias y patrimonio de la humanidad, se convierte en una necesidad la puesta en marcha de métodos que puedan minimizar cualquier amenaza que caiga sobre ella, tornándose este estudio como “un granito de arena” en el camino a tal objetivo.

En cuanto al ámbito económico, para la elaboración de este proyecto de grado es necesario el uso de algunos estudios de suelos que han de ser proporcionados por profesores y

empresas de estudios geotécnicos localizadas en la ciudad de Cartagena, y teniendo en cuenta que la investigación es de tipo bibliográfica-descriptiva, como búsqueda de información y análisis no representa un problema económico para los autores.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar geotécnicamente el subsuelo del sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias, mediante el análisis de información obtenida de estudios de suelos registrados en la zona para determinar su comportamiento ante posibles eventos sísmicos y establecer recomendaciones que ayuden a preservar la arquitectura colonial en la ciudad amurallada patrimonio de la humanidad.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtención de estudios de suelos llevados a cabo en la zona que proporcionen información relevante para llevar a cabo la investigación.
- Construcción de una caracterización geotécnica del subsuelo partiendo de los estudios de suelos obtenidos de ingenieros y empresas especializadas en geotecnia que se desenvuelven en el sector.
- Evaluación del potencial de licuefacción del subsuelo del sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias.
- Determinación del comportamiento sísmico del subsuelo a partir del potencial de licuefacción, la velocidad de onda de corte y el periodo fundamental promedio.
- Identificación de los sistemas constructivos y tipos de cimentación encontrados en el sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias.
- Proporcionar recomendaciones en pro de la conservación del patrimonio arquitectónico de la ciudad.

4. ALCANCES

4.1 DELIMITACIÓN ESPACIAL.

La investigación que se llevó a cabo tuvo como objeto de estudio el sector San Pedro, ubicado en el sector amurallado de la ciudad de Cartagena de Indias D. T. y C, la cual está localizada en el norte del departamento de Bolívar (Colombia), presenta una humedad promedio del 90%, una temperatura promedio 29° Celsius y se encuentra a 10° 26' latitud norte y 75° 33' de longitud oeste de Greenwich (Cartagena Caribe, 2015).

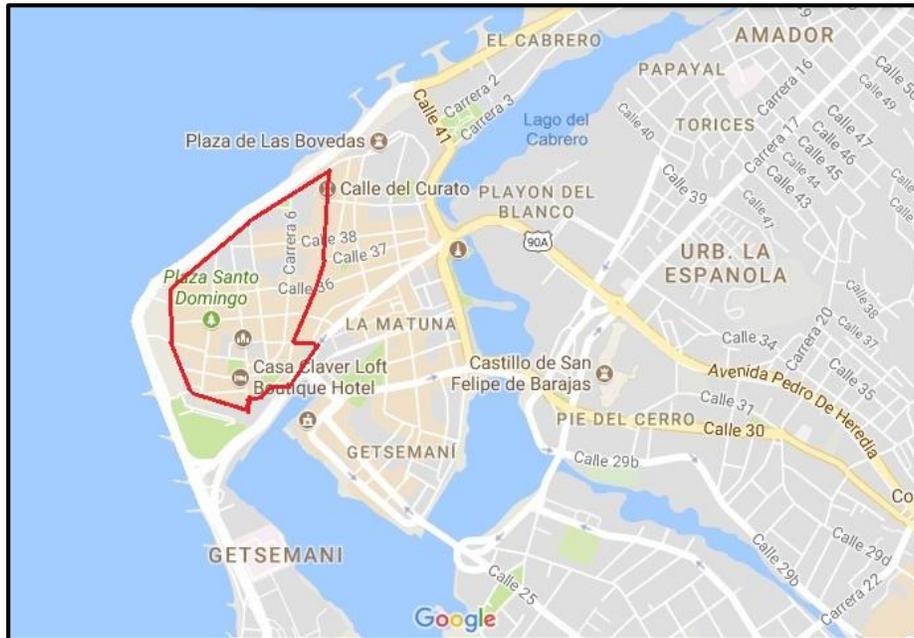


Ilustración 1. Ubicación geográfica zona de estudio - Cartagena, Colombia.

Fuente: (Google Maps, 2017)

4.2 DELIMITACIÓN TEMPORAL.

Este proyecto se elaboró desde la recopilación de información hasta la entrega del documento final, en el transcurso del segundo periodo académico del año 2017, comprendido entre el 25 de julio hasta el 17 de noviembre.

4.3 DELIMITACIÓN CONCEPTUAL

En esta investigación se efectuó la recopilación de estudios geotécnicos realizados en el sector, con el fin de registrar, analizar y referenciar los distintos datos proporcionados que pudiesen ser de ayuda para llevar acabo la caracterización geotécnica y evaluar el potencial de licuefacción para así, determinar el comportamiento sísmico del subsuelo y poder proporcionar recomendaciones a favor de la conservación del patrimonio y la seguridad de las personas que acuden al sitio.

4.4 RESULTADOS

Mediante el análisis de los datos proporcionados por los diferentes ingenieros y empresas, se caracterizó geotécnicamente el sector en estudio, además se estableció qué tan licuable es el sitio para así llegar a la determinación del comportamiento sísmico del subsuelo con la velocidad de onda de corte y el periodo fundamental de vibración del sector de estudio. Por último se presentaron varias recomendaciones contemplando los tipos de cimentación y sistemas constructivos de las edificaciones tipo en el sector, con el objetivo de aportar a la conservación del patrimonio y a la seguridad de vidas humanas ante la presencia de sismos en la ciudad.

4.5 LIMITACIONES

Debido a limitaciones de tipo económicas, este estudio no contempló la ejecución de una microzonificación sísmica puesto que en tal caso habrían sido necesarios recursos proporcionados por terceros.

5. METODOLOGÍA

Este trabajo de grado desarrolló siendo una investigación no experimental, de carácter mixto de tipo bibliográfica-descriptiva puesto que se basó en estudios documentales y en la descripción mediante una caracterización geotécnica, determinación del potencial de licuación y análisis del comportamiento del suelo presente en el sector objeto de estudio delimitado previamente frente a posibles eventos sísmicos. Este proyecto se llevó a cabo en el segundo periodo académico del año 2017 entre los meses de julio y octubre, como trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil de la Universidad de Cartagena.

Este estudio se ejecutó en 5 etapas:

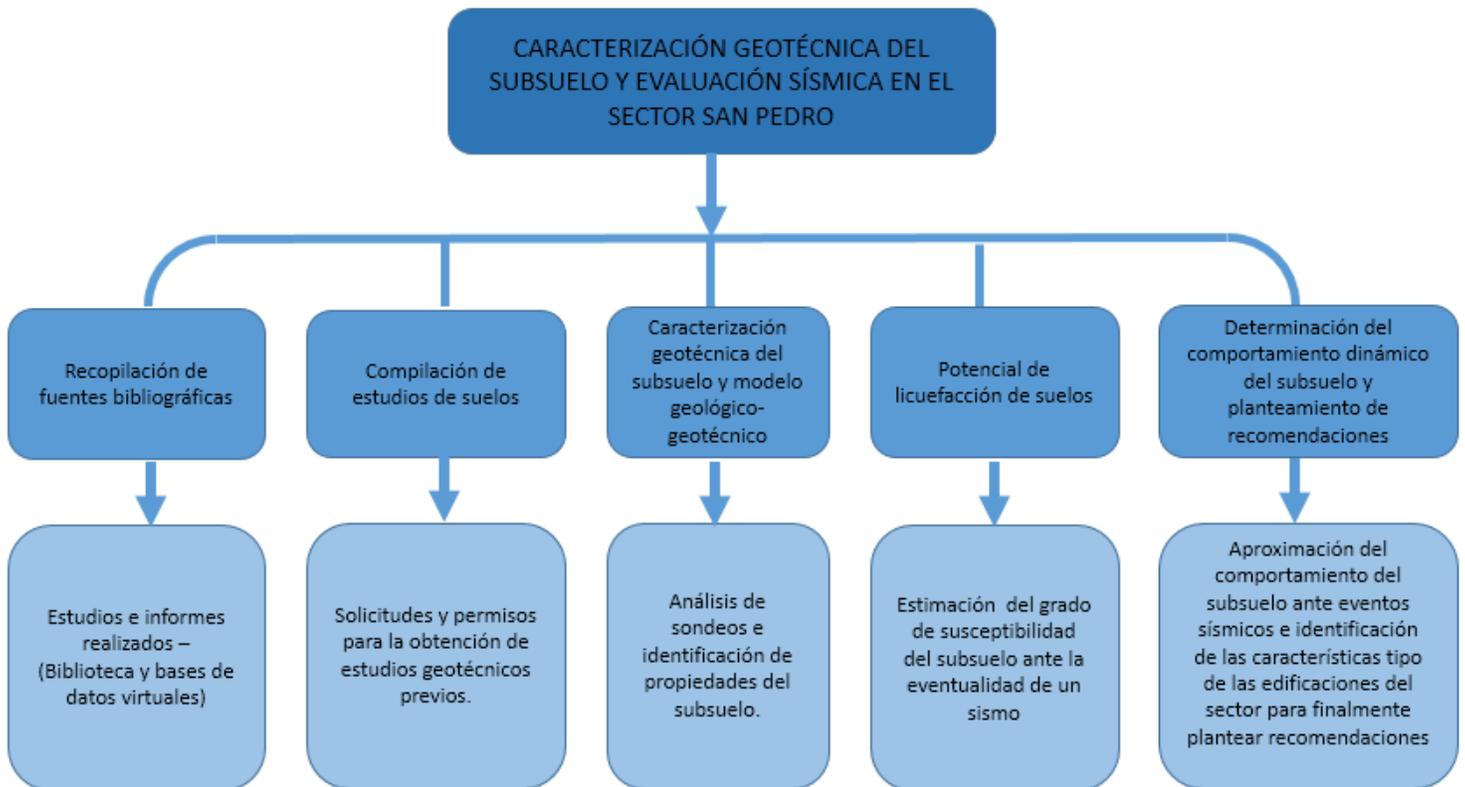


Ilustración 2. Esquema metodología

Fuente: Autores.

- **Etapa 1: Recopilación de fuentes bibliográficas.**

En esta etapa se reunió de la biblioteca y las bases de datos de la universidad de Cartagena, información de estudios e informes realizados a nivel nacional o internacional que ayudaron a tener una visión más general de la investigación con base en lo que en cómo se ha manejado el tema con anterioridad y así nutrir de forma sustancial la investigación en marcha.

De forma paralela, el ingeniero Guilliam Barboza- director de tesis, proporcionó formatos de tabulación y discriminación de información base en el procedimiento a seguir.

- **Etapa 2: Compilación de estudios de suelos relevantes llevados a cabo en la zona de estudio.**

En esta etapa se llevaron a cabo las solicitudes y permisos para la obtención cierta cantidad necesaria de estudios de suelos hechos previamente en el sector San Pedro del Centro histórico de Cartagena a profesores e ingenieros de suelos localizados en la ciudad, indicándoles la necesidad de llevar a cabo este estudio de tipo académico que no representa ganancia económica para los autores ni perjuicios para sus empresas, dichos estudios debían contener los registros de perforaciones y los resultados de laboratorio de las muestras tomadas, pudiendo obtener de ellos datos como profundidad (m), clasificación de suelo, humedad natural (%), consistencias (Ll, Lp, Ip), No. De golpes por pie, módulo de elasticidad, cohesión, porcentaje de suelos que pasan por los tamices No. 4 y No. 200, entre otros. Además se contó con las sugerencias de dichos profesionales que aportaron conocimiento a la elaboración del proyecto.

- **Etapa 3: Caracterización geotécnica del subsuelo y modelo geológico-geotécnico.**

En esta etapa se tomó la información de los sondeos recopilados, se analizaron dichos sondeos para poder conocer o identificar las propiedades del subsuelo tales como el módulo de elasticidad (E), el Angulo de fricción (Φ), el peso unitario del suelo (γ_d), entre otros, del sector en cuestión y con esto caracterizar geotécnicamente el subsuelo y consiguientemente se puso en marcha el modelo geológico-geotécnico del mismo.

- **Etapa 4: Potencial de licuefacción de suelos.**

A partir de la caracterización geotécnica del subsuelo, la determinación de una serie de parámetros del suelo y el modelo geológico-geotécnico, se concluyó el potencial de licuefacción del terreno con el objetivo de estimar el grado de susceptibilidad de este ante la eventualidad de un sismo.

Para la determinación del potencial de licuefacción se utilizó el método que presenta Kishida y Ohsaki (1969 y 1970), teniendo en cuenta el número de golpes en el suelo que es proporcionado por medio de los ensayos SPT obtenidos anteriormente por distintos ingenieros y empresas relacionadas con el tema.

- **Etapa 5: Determinación del comportamiento dinámico del subsuelo.**

Con la ayuda de información adquirida de la red sismológica nacional y con la determinación del potencial de licuefacción de suelos, se realizaron aproximaciones con respecto al comportamiento que posee el subsuelo ante eventos sísmicos calculando valores promedios de velocidad de onda de corte y periodo fundamental, comparándolo con el periodo aproximado (T_a) de las edificaciones de la zona en estudio, además se identificaron los sistemas constructivos y cimentaciones predominantes en el sector y se proporcionaron varias recomendaciones basadas en el estudio ya realizado que permitan mitigar daños materiales y/o humanos ante la ocurrencia de un terremoto.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para ejecutar el presente trabajo de grado, fue necesaria la recopilación de sondeos realizados anteriormente por ingenieros geotecnistas, así como sus respectivos ensayos de laboratorio del subsuelo. Luego se ubicó en la Ilustración 3 cada estudio suministrado y se excluyeron aquellos que no pertenecían a la zona objeto de estudio, posteriormente se procedió con el análisis de la información para lograr los objetivos propuestos en el proyecto.

6.1 LISTA DE SONDEOS REGISTRADOS.

LISTA DE SONDEOS EJECUTADOS EN EL SECTOR	
S1	Calle Don Sancho N 36-41 y N 36-49
S2	Calle del Porvenir (Edificio Ganem)
S3	Centro Calle de Ajos con calle de la Iglesia
S4	Centro Calle Don sancho N 37-27
S5	Centro Calle Santo Domingo N 33-63
S6	Centro Callejón de los Estribos N 2-74
S7	Centro Plaza del Tejadillo N 5-108
S8	Conjunto Residencial Santo Domingo
S9	Centro Calle las Damas Casa # 3-110
S10	Centro Calle Don Sancho 36-57
S11	Centro Calle 2 de Badillo (Casa Santo Toribio)
S12	Centro - Calle Porvenir- Soledad esquina
S13	Centro Calle Sargento Mayor (Iglesia Santo Toribio)

Tabla 1. Lista de sondeos ejecutados en el sector.

Fuente: autores.

6.2 UBICACIÓN DE LOS SONDEOS

Los sondeos obtenidos con ubicación dentro del perímetro del sector de San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias, fueron señalados en la Ilustración 3, la cual muestra la distribución de los distintos sondeos realizados en la zona y su ubicación. Sabiendo esto se procedió a analizar la información recopilada y se comenzó a llevar a cabo la caracterización geotécnica del sector objeto de estudio.

6.3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Para la realización de la caracterización geotécnica del sector de San Pedro en el centro histórico de la ciudad de Cartagena se analizó la información brindada por los sondeos y demás estudios recopilados y se organizó por medio de un formato de descripción de sondeos (Ilustración 4), proporcionado por el ingeniero Guilliam Barboza, en el cual se puede identificar la variación del número de golpes derivado de los ensayos SPT, con respecto a la profundidad y naturaleza que presenta cada estrato presente en el terreno.

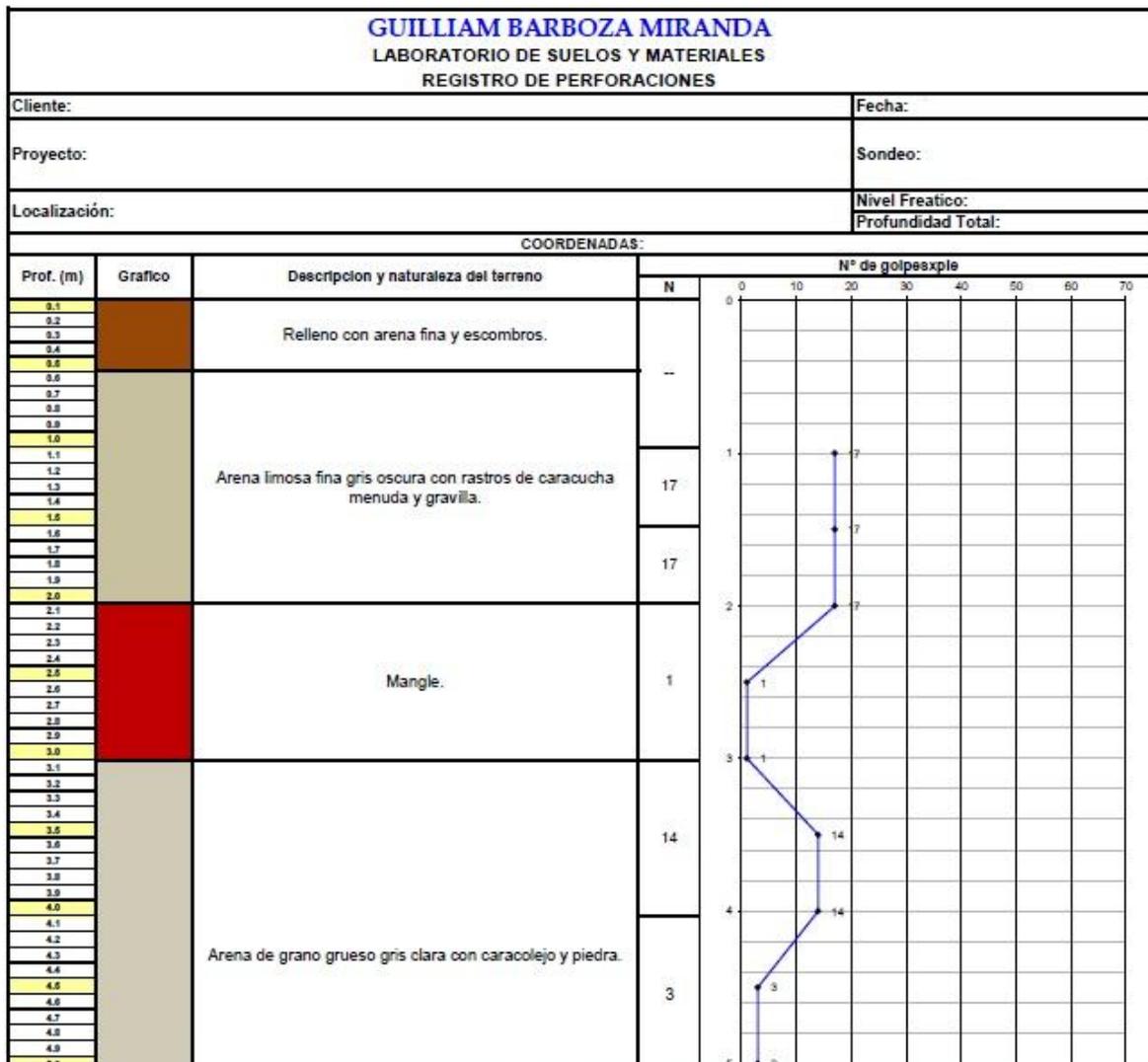


Ilustración 4. Formato de descripción de sondeos

Fuente: Ing. Guilliam Barboza.

Además, fue necesario el cálculo de algunas propiedades del suelo de los sondeos, esto debido a que no se contaba con demasiado detalle en la información obtenida y era menester para tener una visión de las características del subsuelo presente en la zona de estudio.

Módulo de elasticidad (E):

$$E = \#de\ golpes * 76,6$$

Ecuación 1 Módulo de elasticidad

Coefficiente de uniformidad (Cu):

$$Cu = \#de\ golpes * 0,44$$

Ecuación 2. Coeficiente de uniformidad.

Angulo de fricción interna (ϕ):

$$\phi = \sqrt{20 * \#de\ golpes} + 20$$

Ecuación 3. Angulo de fricción interna.

Peso unitario seco (γ_d):

$$\gamma_d = (0,23 * \ln(\#de\ golpes)) + 1,18$$

Ecuación 4. Peso unitario seco

Peso unitario del suelo húmedo (γ_t):

$$\gamma_t = \left[\frac{\gamma_d}{1 + \frac{Wn}{100}} \right]$$

Ecuación 5. Peso unitario del suelo húmedo.

6.4 TABLAS RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS SONDEOS DOCUMENTADOS

Sondeo S1: se halló el nivel freático a una profundidad de 1 metro y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 2.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 3,0	1- 8	Arena limosa parda oscura con escombros.	35.9 - 41.7	2.65	76.6 - 612.8	0.44 - 3.52	1.18 - 1.66	0.87 - 1.17	SM
3,0-5,0	8 - 15	Arena limosa de baja plasticidad, gris oscura con caracuchas menudas, de densidad media.	31.9 - 35.9	2.65	612.8 - 1149	3.52 - 6.6	1.66 - 1.8	1.26 - 1.32	

Tabla 2. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 1.

Fuente: autores.

Sondeo S2: Se halló el nivel freático a una profundidad de 0.8 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 3.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0 - 1,0	-	Relleno de arena con escombros.	-	-	-	-	-	-	-
1,0- 2,6	2 - 5	Arena limosa fina gris oscura con rastros de caracuchas menuda, muy suelta.	28.2 - 29.3	2.65	153.2 - 383	0.88 - 2.2	1.34 - 1.55	1.05 - 1.2	SM
2,6 - 5,5	15 - 16	Arena fina algo limosa, gris oscura con rastros de caracuchas menudas. Medianamente compacta.	28.3 - 30	2.65	1149 - 1225.6	6.6 - 7.04	1.8 - 1.82	1.4	SP-SM
5,5 - 8,2	21 - 18	Arena limosa fina gris oscura con fragmentos de madera (mangle). Medianamente Compacta.	27.8 - 32.4	2.65	1608.6 - 1378.8	9.24 - 7.92	1.88 - 1.84	1.47 - 1.39	SM
8,2 - 10,5	18 - 27	Arena limosa gris clara con caracolejo, caracucha menuda y rastros de piedra coralina, medianamente compacta.	26.1 - 26.5	2.65	1378.8 - 2068.2	7.92 - 11.88	1.84 - 1.94	1.46 - 1.53	SP-SM

Tabla 3. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 2.

Fuente: autores.

Sondeo S3: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1 metro y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 4.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	yd (t/m3)	yt (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0 - 0,2	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	
0,2 - 2,2	---	Arena limosa fina , con caracolejo, caracucha menuda y escombros. Muy suelta.	27.5 - 29.8	2.65	---	---	---	---	SM
2,2 - 5,5	7 - 12	Arena limosa fina gris oscura, suelta a medianamente compacta.	25.9 - 32.6	2.65	536.2 - 919.2	3.08 - 5.28	1.63 - 1.75	1.29 - 1.32	
5,5 - 6,4	25	Arena limosa fina gris oscura, suelta a medianamente compacta.	33	2.65	1915	11	1.92	1.44	
6,4 - 9,2	16 - 20	Arena fina ligeramente limosa, gris clara con caracolejo y caracuchas menudas, medianamente compacta.	28.6 - 29.7	2.65	1225.6 - 1532	7.04 - 8.8	1.82 - 1.87	1.42 - 1.44	SP-SM
9,2 - 12,7	8 - 9	Arena limosa gruesa gris clara, con piedra pomez, suelta.	33.2 - 34.7	2.65	612.8 - 689.4	3.52 - 3.96	1.66 - 1.69	1.25	GP-GM
12,7 - 14,5	10 - 11	Arena limosa gruesa gris clara, con piedra pomez, suelta.	30.7 - 33.2	2.65	766 - 842.6	4.4 - 4.84	1.71 - 1.73	1.31 - 1.3	SM
14,5 - 16	26 - 42	Arena gruesa algo limosa, gris clara, con piedra coralina compacta.	25.8 - 26.2	2.65	1991.6 - 3217.2	11.44 - 18.48	1.93 - 2.04	1.53 - 1.62	GP-GM

Tabla 4. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 3.

Fuente: autores.

Sondeo S4: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1 metro y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 5.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	yd (t/m3)	yt (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	
0,1 - 1,1	---	Arena limosa habana oscura con escombros y compacidad relativa muy suelta.	---	-	---	---	---	---	-
1,1 - 2,5	4	Arena limosa habana fina oscura, compacidad suelta.	33.3 - 33.5	2.65	306.4	1.76	1.5	1.13 - 1.12	SM
2,5 - 4,0	7	Arena limosa habana fina oscura, pobremente gradada, compacidad suelta.	32.6	2.65	536.2	3.08	1.63	1.23	SP
4,0 - 5,5	10	Arena limosa fina gris oscura con caracuchas menudas y caracolejo. Compacidad entre suelta y media.	32.9	2.65	766	4.4	1.71	1.29	SW-SM
5,5 - 7,5	16 - 20	Arena limosa gris oscura bien gradada con caracucha menuda y rastros de limo.	32.8 - 33	2.65	1225.6 - 1532	7.04 - 8.8	1.82 - 1.87	1.37 - 1.41	

Tabla 5. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 4.

Fuente: autores.

Sondeo S5: Se halló el nivel freático a una profundidad de 0.9 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 6.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γ_d (t/m3)	γ_t (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 0,8	---	Relleno de Escombros	---	-	---	---	---	---	-
0,8 - 2,0	3 - 5	Arena limosa, gris oscura con rastros de caracuchas menudas. Compacidad suelta.	23.2 - 23.8	2.65	229.8 - 383	1.32 - 2.2	1.43 - 1.55	1.16 - 1.25	SM
2,0 - 3,4	5 - 13	Arena limosa, gris oscura con china, compacidad media.	27.5	2.65	383 - 995.8	2.2 - 5.72	1.55 - 1.77	1.22 - 1.39	
3,4 - 5,0	6 - 13	Arena limosa, gris clara, compacidad suelta.	29.3	2.65	459.6 - 995.8	2.64 - 5.72	1.59 - 1.77	1.23 - 1.37	
5,0 - 5,5	8	Arena limosa gris clara, mezclado con mangle. Compacidad suelta.	26.8	2.65	612.8	3.52	1.66	1.31	
5,5 - 7,0	8	Arena limosa gris clara, mezclado con mangle. Compacidad suelta.	26.8	2.65	612.8	3.52	1.66	1.31	
7,0 - 8,5	13	Arena limosa, gris oscura con caracolejo y caracuchas menudas, compacidad media.	29.7 - 29.8	2.65	995.8	5.72	1.77	1.36 - 1.36	
8,5 - 11,3	9 - 56	Arena limosa, muy suelta gris oscura con caracolejo, caracuchas menudas y rastros de piedra coralina. Muy Compacta.	29.8 - 30.6	2.65	689.4 - 4289.6	3.96 - 24.64	1.69 - 2.11	1.3 - 1.62	
11,3 - 12,7	21 - 44	Arena limosa, gris clara con piedra coralina y caracuchas menudas. Compacta.	29.6	2.65	1608.6 - 3370.4	9.24 - 19.36	1.88 - 2.05	1.45 - 1.58	
12,7 - 15,0	21 - 29	Arcilla inorgánica, limosa, parda clara, de consistencia dura, con vetas grises, óxido negro y calizas.	27.5 - 28.8	2.75	1608.6 - 2221.4	9.24 - 12.76	1.88 - 1.95	1.47 - 1.51	SL

Tabla 6. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 5.

Fuente: autores.

Sondeo S6: Se halló el nivel freático a una profundidad de 0.6 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 7.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificacion (U.S.C)
0 - 0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1 - 1,1	2	Relleno de escombros con arena limosa, muy suelta.	38.5	2.65	153.2	0.88	1.34	0.97	SM
1,1 - 2,0	2 - 4	Arena limosa gris oscura fina suelta	30.2	2.65	153.2 - 306.4	0.88 - 1.76	1.34 - 1.5	1.03 - 1.15	
2,0 - 3,0	4	Arena pobremente gradada, suelta.	34.5	2.65	306.4	1.76	1.5	1.12	
3,0 - 5,5	4 - 11	Arena limosa fina gris oscuro con caracuchas menudas, con mangle y caracolejo, suelta a media.	39.9	2.65	306.4 - 842.6	1.76 - 4.84	1.5 - 1.73	1.07 - 1.24	SP-SM
5,5 - 6,7	5 - 11	Arena limosa fina gris oscuro con caracuchas menudas, con mangle y caracolejo, suelta a media.	44.9	2.65	383 - 842.6	2.2 - 4.84	1.55 - 1.73	1.07 - 1.19	GP-GM
6,7 - 10,5	2 - 21	Arena gruesa gris claro con caracolejo, caracuchas menudas y piedra pomez, de suelta a media.	26.5 - 32.2	2.65	153.2 - 1608.6	0.88 - 9.24	1.34 - 1.88	1.06 - 1.42	SM

Tabla 7. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 6.

Fuente: autores.

Sondeo S7: Se halló el nivel freático a una profundidad de 2 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 8.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificacion (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1 - 1,5	2 - 3	Relleno de escombros con arena fina gris, muy suelta.	26 - 26.7	2.65	153.2 - 229.8	0.88 - 1.32	1.34 - 1.43	1.06 - 1.13	SM-SP
1,5 - 2,0	2	Arena fina habana clara con piedras, suelta.	26	2.65	153.2	0.88	1.34	1.06	SM
2,0 - 5,5	2 - 18	Arena limosa fina habana clara media.	24.6 - 25.2	2.65	153.2 - 1378.8	0.88 - 7.92	1.34 - 1.84	1.08 - 1.47	
5,5 - 7,5	26 - 35	Arena limosa fina habana clara media gris.	26.7 - 27	2.65	1991.6 - 2681	11.44 - 15.4	1.93 - 2	1.52 - 1.57	

Tabla 8. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 7.

Fuente: autores.

Sondeo S8: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1.4 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 9.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificacion (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1 - 0,5	---	Relleno de escombros con piedras y arena limosa gris fina.	---	-	---	---	---	---	-
0,5 - 1,5	5	Arena limosa gris fina con escombros, suelta.	29.8	2.65	383	2.2	1.55	1.19	SM
1,5 - 2,3	8	Arena limosa gris fina, suelta.	28.7	2.65	612.8	3.52	1.66	1.29	
2,3 - 4,0	11	Arena media gris clara pobremente gradada con caracucha menuda y rastros de limo, media.	21.2	2.65	842.6	4.84	1.73	1.43	SM-SP
4,0 - 5,5	15	Arena limosa gris fina con rastros de materia orgánica, media.	26.8	2.65	1149	6.6	1.8	1.42	SM
5,5 - 6,0	16	Arena limosa gris fina con rastros de materia orgánica, media.	27	2.65	1225.6	7.04	1.82	1.43	

Tabla 9. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 8.

Fuente: autores.

Sondeo S9: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1 metro y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 10.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificacion (U.S.C)
0-1,0	-	Relleno de arena con demoliciones en estado muy suelto	-	-	-	-	-	-	-
1,0 - 1,5	2 - 6	Arena limosa parda oscura con demoliciones con densidad relativa muy suelta	11	2.65	153,2 - 459,6	0,88 - 2,64	1,34 - 1,59	1,21 - 1,43	SM
1,5 - 2,5	6 - 14	Arena fina parda oscura con densidad relativa suelta	11 - 12	2.65	459,6 - 1072,4	2,64 - 6,16	1,59 - 1,79	1,43 - 1,6	
2,5 - 3,5	14 - 19	Arena fina gris oscura con densidad relativa mediana	11 - 12	2.65	1072,4 - 1455,4	6,16 - 8,36	1,79 - 1,86	1,61 - 1,66	
3,5 - 5,0	19 - 22	Arena fina gris oscura con densidad relativa mediana	10 - 12	2.65	1455,4 - 1685,2	8,36 - 9,68	1,89	1,69	
5,0 - 7,0	22	Arena fina gris oscura con densidad relativa mediana	10 - 11	2.65	1685.2	9.68	1.89	1,72 - 1,7	

Tabla 10. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 9.

Fuente: autores.

Sondeo S10: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1 metro y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 11.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m ²)	Cu (t/m ²)	γ _d (t/m ³)	γ _t (t/m ³)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Piso de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 1,0	3	Sobre relleno suelto de arena fina limosa parda claro	9	-	229.8	1.32	1.43	1.31	SM
1,0 - 2,0	3 - 7	Arena fina parda clara con densidad relativa suelta	9	2.65	229,8 - 536,2	1,32 - 3,08	1,43 - 1,63	1,31 - 1,5	
2,0 - 3,0	7 - 16	Arena fina parda clara con densidad relativa mediana	8 - 9	2.65	536,2 - 1225,6	3,08 - 7,04	1,63 - 1,82	1,51 - 1,67	
3,0 - 5,0	15 - 16	Arena fina parda clara con densidad relativa mediana	8 - 9	2.65	1149 - 1225,6	6,6 - 7,04	1,8 - 1,82	1.67	
5,0 - 6,0	15 - 18	Arena fina parda clara con densidad relativa mediana	9	2.65	1149 - 1378,8	6,6 - 7,92	1,8 - 1,84	1,65 - 1,69	

Tabla 11. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 10.

Fuente: autores.

Sondeo S11: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1.4 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 12.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m ²)	Cu (t/m ²)	γ _d (t/m ³)	γ _t (t/m ³)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Plantilla de cemento	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 0,5	2	Relleno de demoliciones con arena parda	9	-	153.2	0.88	1.34	1.23	SM
0,5-1,0	2	Relleno de arena parda oscura con caracolejo demoliciones menudos y ladrillos rojos	9	2.65	153.2	0.88	1.34	1.23	
1,0 - 1,5	2 - 5	Arena fina parda clara con densidad relativa suelta	9	2.65	153,2 - 383	0,88 - 2,2	1,34 - 1,55	1,23 - 1,42	
1,5 - 2,5	5 - 8	Arena fina parda clara con densidad relativa suelta	9	2.65	383 - 612,8	2,2 - 3,52	1,55 - 1,66	1,42 - 1,52	
2,5 - 3,5	8 - 15	Arena fina gris oscura con densidad relativa suelta	8 - 9	2.65	612,8 - 1149	3,52 - 6,6	1,66 - 1,8	1,54 - 1,65	
3,5-4,5	15 - 22	Arena fina gris oscura con densidad relativa suelta	9 - 10	2.65	1149 - 1685,2	6,6 - 9,68	1,8 - 1,89	1,65 - 1,72	
4,5-5,5	22 - 30	Arena fina gris oscura con densidad relativa mediana	9	2.65	1685,2 - 2298	9,68 - 13,2	1,89 - 1,96	1,73 - 1,8	
5,5-7,0	30 - 34	Arena fina gris oscura con densidad relativa muy densa	9	2.65	2298 - 2604,4	13,2 - 14,96	1,96 - 1,99	1,8 - 1,83	

Tabla 12. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 11.

Fuente: autores.

Sondeo S12: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1.2 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 13.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γ_d (t/m3)	γ_t (t/m3)	Clasificacion (U.S.C)
0-0,1	-	Baldosa y plantilla	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 1,0	3	Relleno de arena coralina con demoliciones con densidad relativa muy suelta	9	-	229,8	1,32	1,43	1,31	SM
01,0- 2,0	3 - 4	Arena limosa parda oscura con densidad relativa muy suelta	9	2,65	229,8 - 306,4	1,32 - 1,76	1,43 - 1,5	1,31 - 1,38	
2,0 - 3,5	4 - 7	Arena fina gris oscura con densidad relativa suelta	11	2,65	306,4 - 536,2	1,76 - 3,08	1,5 - 1,63	1,35 - 1,47	
3,5 - 4,0	7 - 11	Arena fina gris claro con densidad relativa suelta	11 - 12	2,65	536,2 - 842,6	3,08 - 4,84	1,63 - 1,73	1,47 - 1,54	
4,0-5,0	11 - 17	Arena fina gris claro con densidad relativa mediana	8 - 9	2,65	842,6 - 1302,2	4,84 - 7,48	1,73 - 1,83	1,6 - 1,68	
5,0- 6,0	17 - 22	Arena fina gris claro con densidad relativa mediana	9 - 10	2,65	1302,2 - 1685,2	7,48 - 9,68	1,83 - 1,89	1,68 - 1,72	
6,0 - 7,0	22 - 24	Arena fina gris claro con densidad relativa mediana	9	2,65	1685,2 - 1838,4	9,68 - 10,56	1,89 - 1,91	1,73 - 1,75	

Tabla 13. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 12.

Fuente: autores.

Sondeo S13: Se halló el nivel freático a una profundidad de 1.8 metros y se encontraron características del suelo tales como las mostradas en la Tabla 14.

PROF(mt)	# DE GOLPES	OBSERVACIONES	Wn (%)	Gs	E (t/m2)	Cu (t/m2)	γd (t/m3)	γt (t/m3)	Clasificación (U.S.C)
0-0,1	-	Plantilla de concreto	-	-	-	-	-	-	-
0,1- 1,0	---	Relleno de arena con residuos de demoliciones de construccion	---	-	---	---	---	---	-
1,0- 2,0	7	Arena fina parda clara con densidad relativa suelta	9 - 10	2.65	536.2	3.08	1.63	1.48 - 1.5	SM
2,0- 3,0	7- 15	Arena fina parda clara con densidad relativa media	11	2.65	536,2 - 1149	3,08 - 6,6	1,63 - 1,8	1,47 - 1,62	
3,0- 4,0	15 - 25	Arena fina parda clara con densidad relativa mediana	11 - 12	2.65	1149 - 1915	6,6 - 11	1,8 - 1,92	1,62 - 1,71	
4,0-5,0	25 - 27	Arena fina gris clara con densidad relativa mediana	8 - 10	2.65	1915 - 2068,2	11 - 11,88	1,92 - 1,94	1.76 - 1.78	
5,0- 7,0	27 - 32	Arena fina gris clara con densidad relativa mediana	9 - 10	2.65	2068,2 - 2451,2	11,88 - 14,08	1,94 - 1,98	1,78 - 1,8	

Tabla 14. Resumen de las características geotécnicas del sondeo 13.

Fuente: autores.

6.5 MODELO GEOLOGICO-GEOTECNICO

El modelo geológico-geotécnico presentado más adelante, se generó basado en la unión mediante líneas imaginarias de los puntos de exploración de los ensayos SPT disponibles en el sector de estudio (Ilustración 5), obteniéndose una distribución aproximada de los perfiles de suelos en la zona.

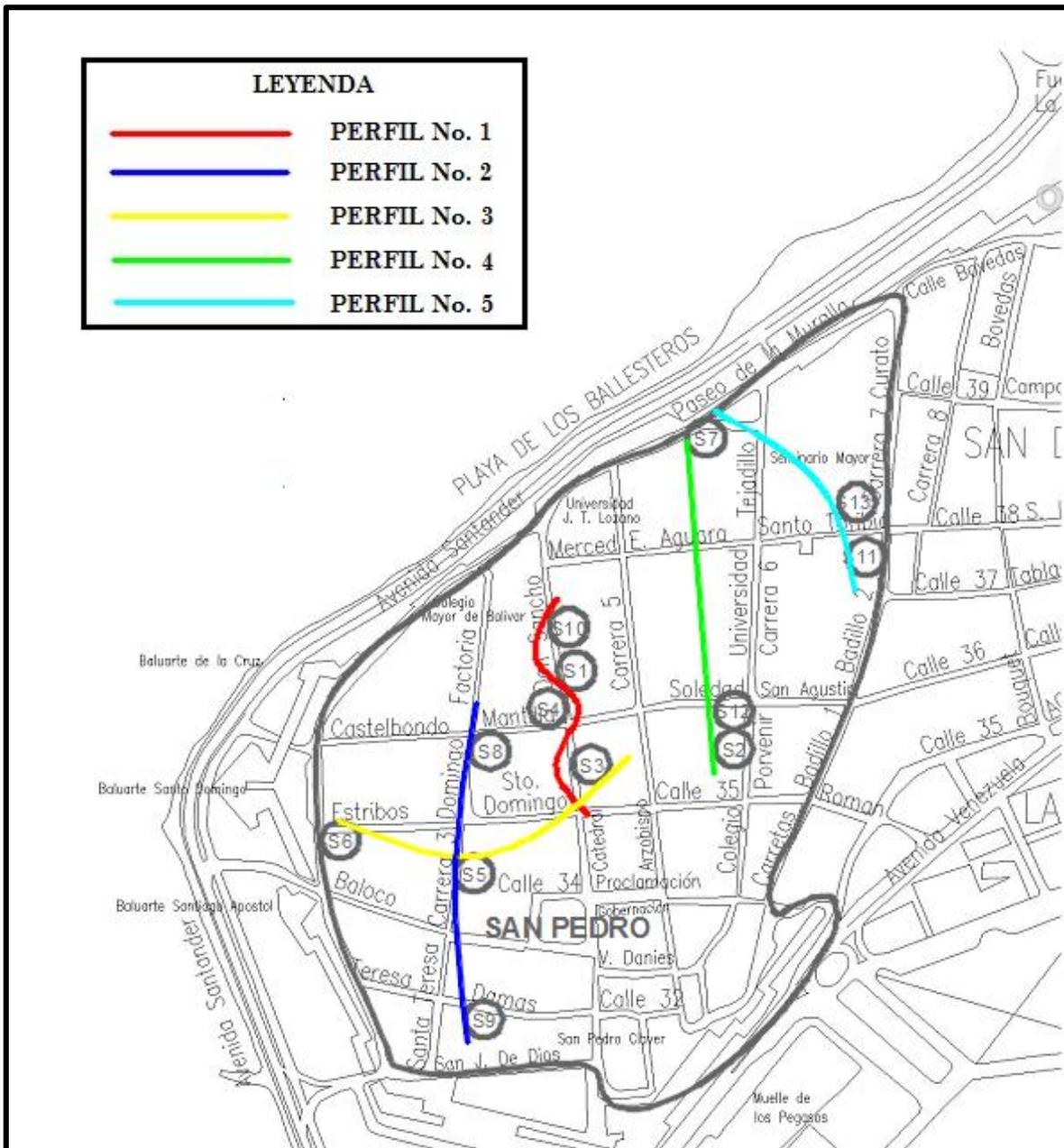


Ilustración 5. Correspondiente al modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

A continuación, se complementa la información descrita en la caracterización geotécnica, presentando una breve descripción de la zona que comprende la actual investigación, basándose en los registros presentados en 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).

Geomorfológico:

En la zona de estudio se identifican unidades geomorfológicas bajas, asociadas en general a sedimentos semiconsolidados de origen marino, fluvial o coluvial, como barras espigas, depósitos de playón y llanuras de manglar.

Litológico:

El sector de San Pedro posee presencia de depósitos de playón, los cuales generalmente son arenas de grano fino-medio de color pardo grisáceo.

Cobertura vegetal:

El sector de San Pedro, situado dentro del centro histórico de la ciudad de Cartagena, se identifica como un sector urbano con poca presencia vegetal.

Aptitud y uso del suelo: La zona de estudio no es susceptible a fenómenos de remoción de masas ni volcamientos.

6.5.1 Perfiles modelo geológico-geotécnico.

6.5.1.1 Perfil 1

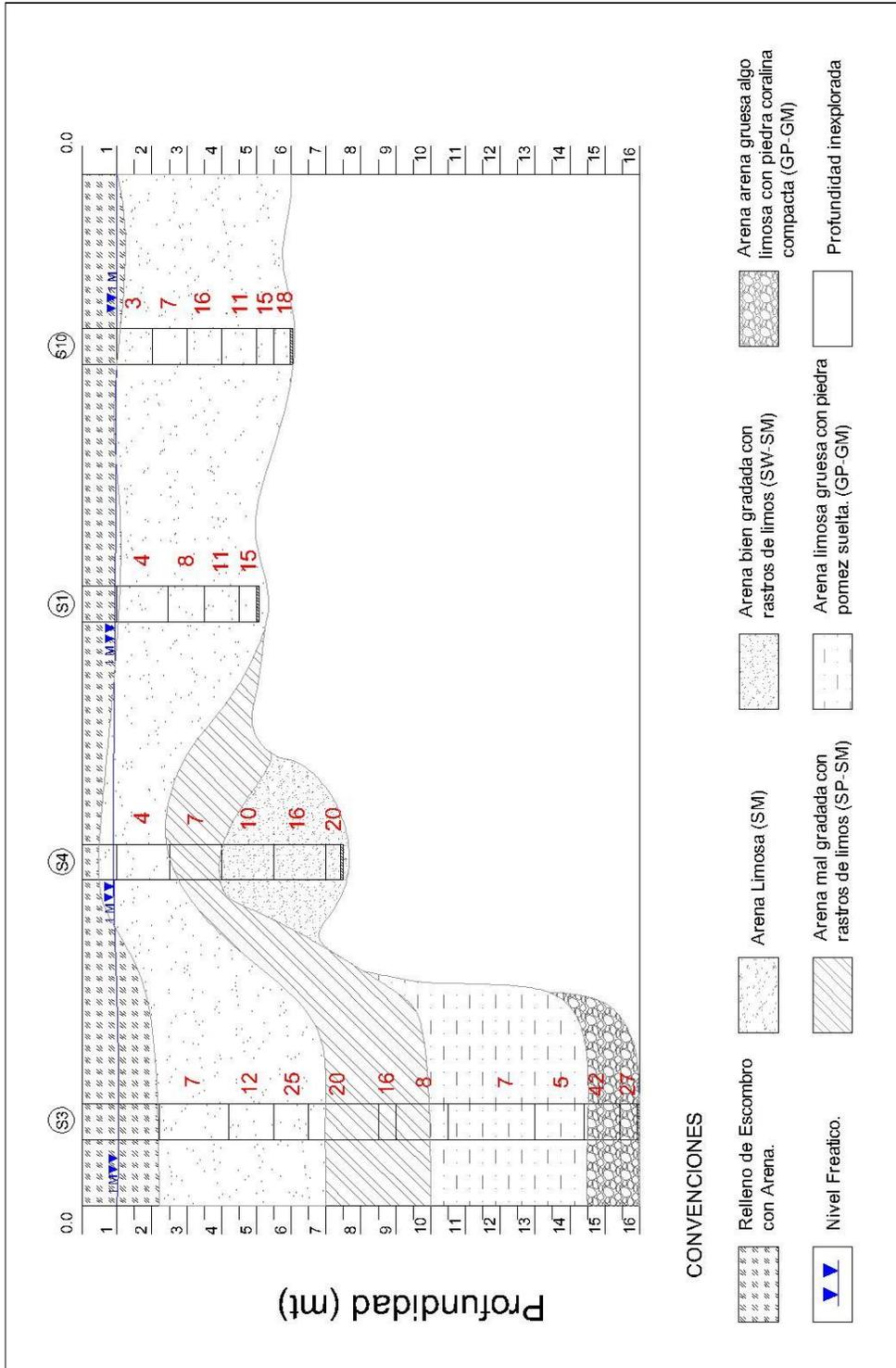


Ilustración 6. Perfil 1 del modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

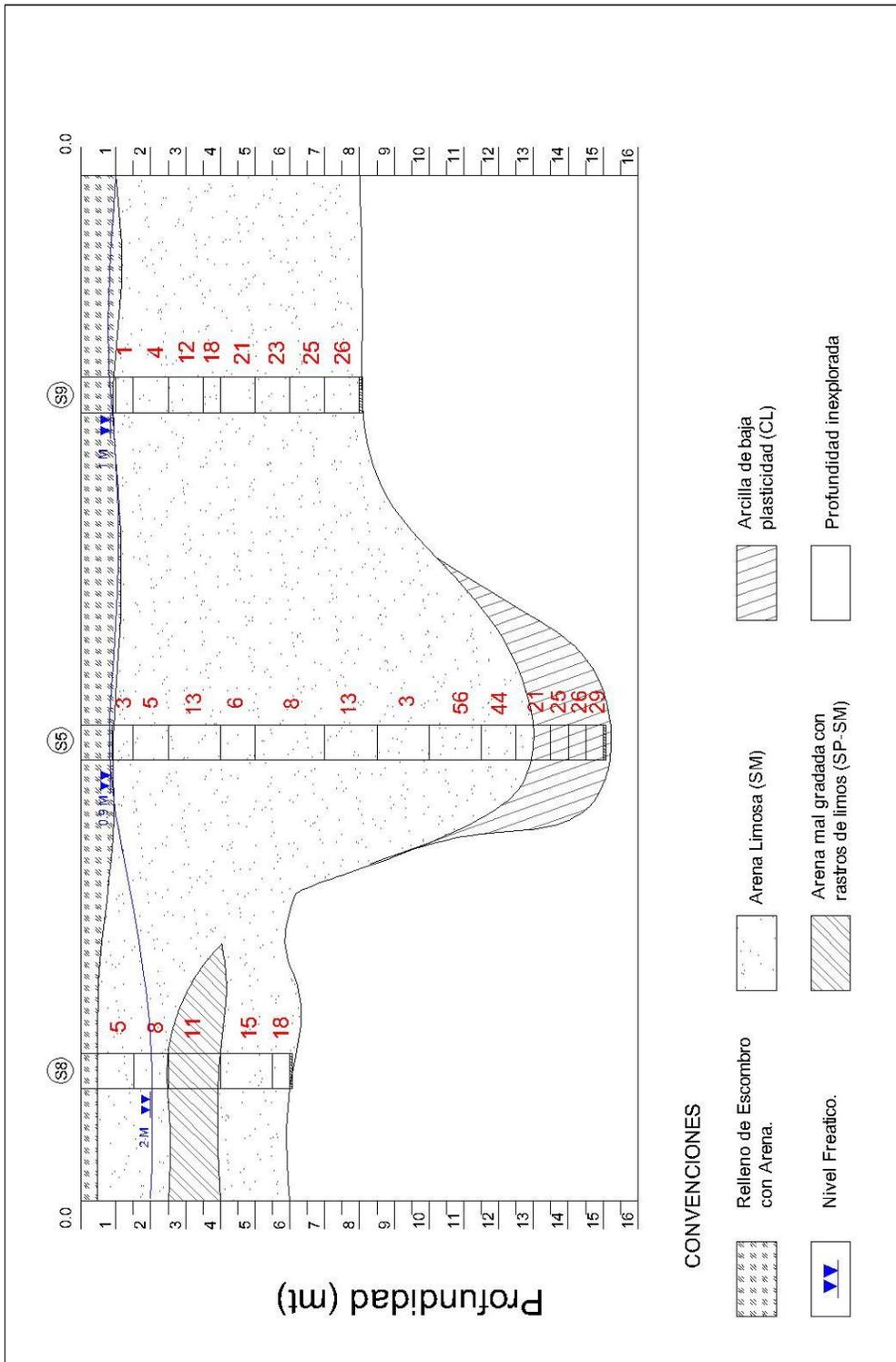


Ilustración 7. Perfil 2 del modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

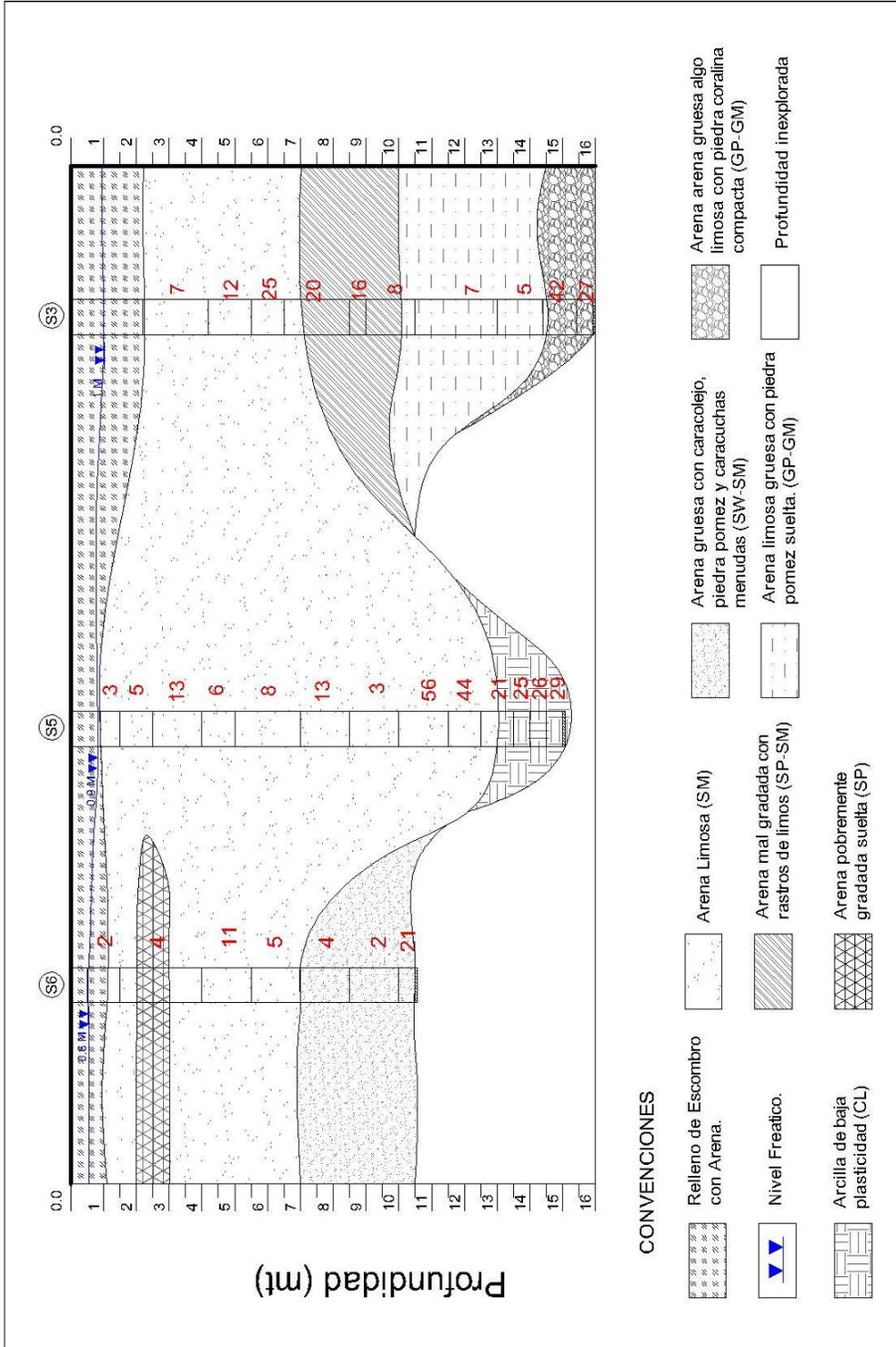


Ilustración 8. Perfil 3 del modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

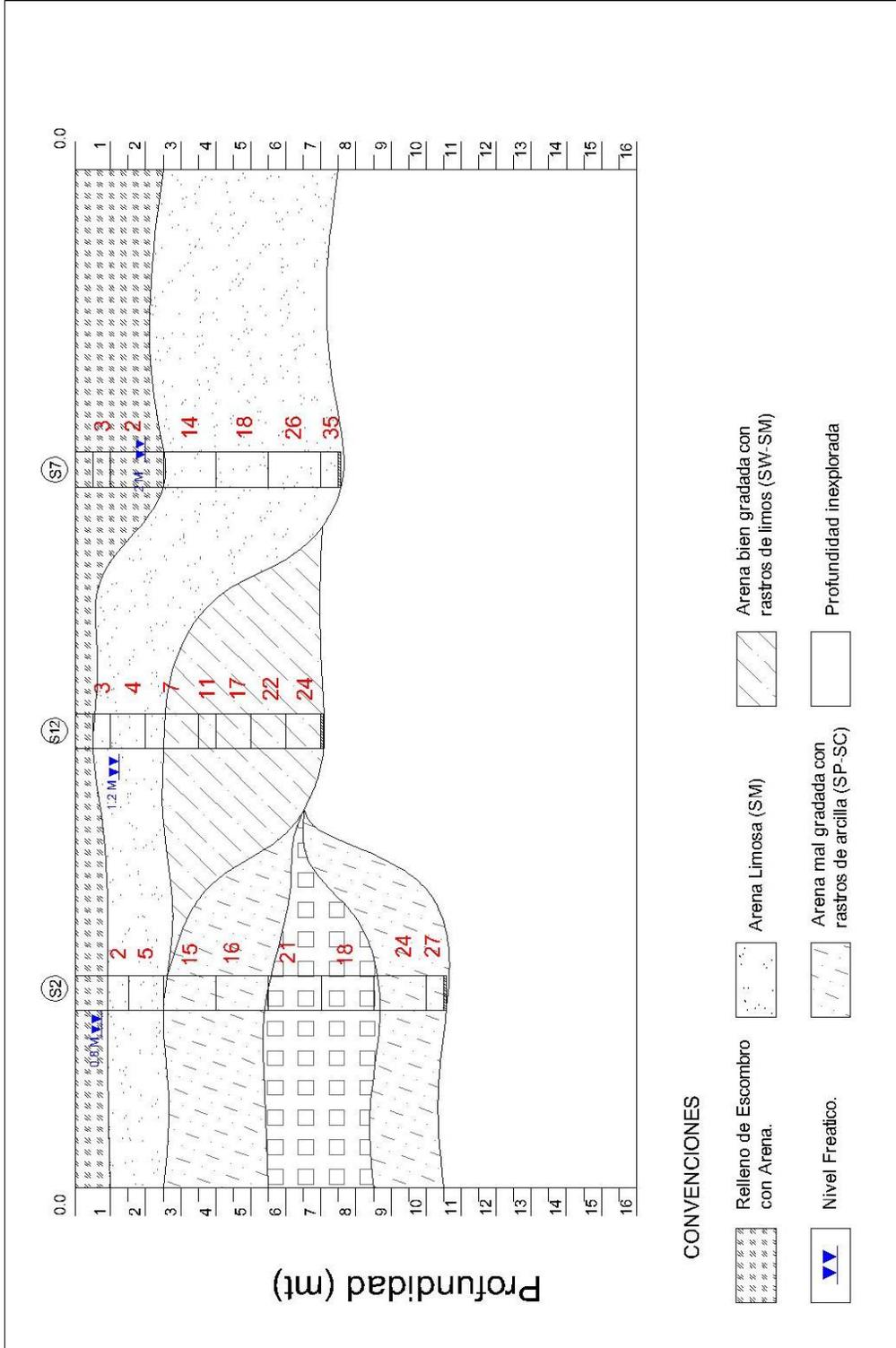


Ilustración 9. Perfil 4 del modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

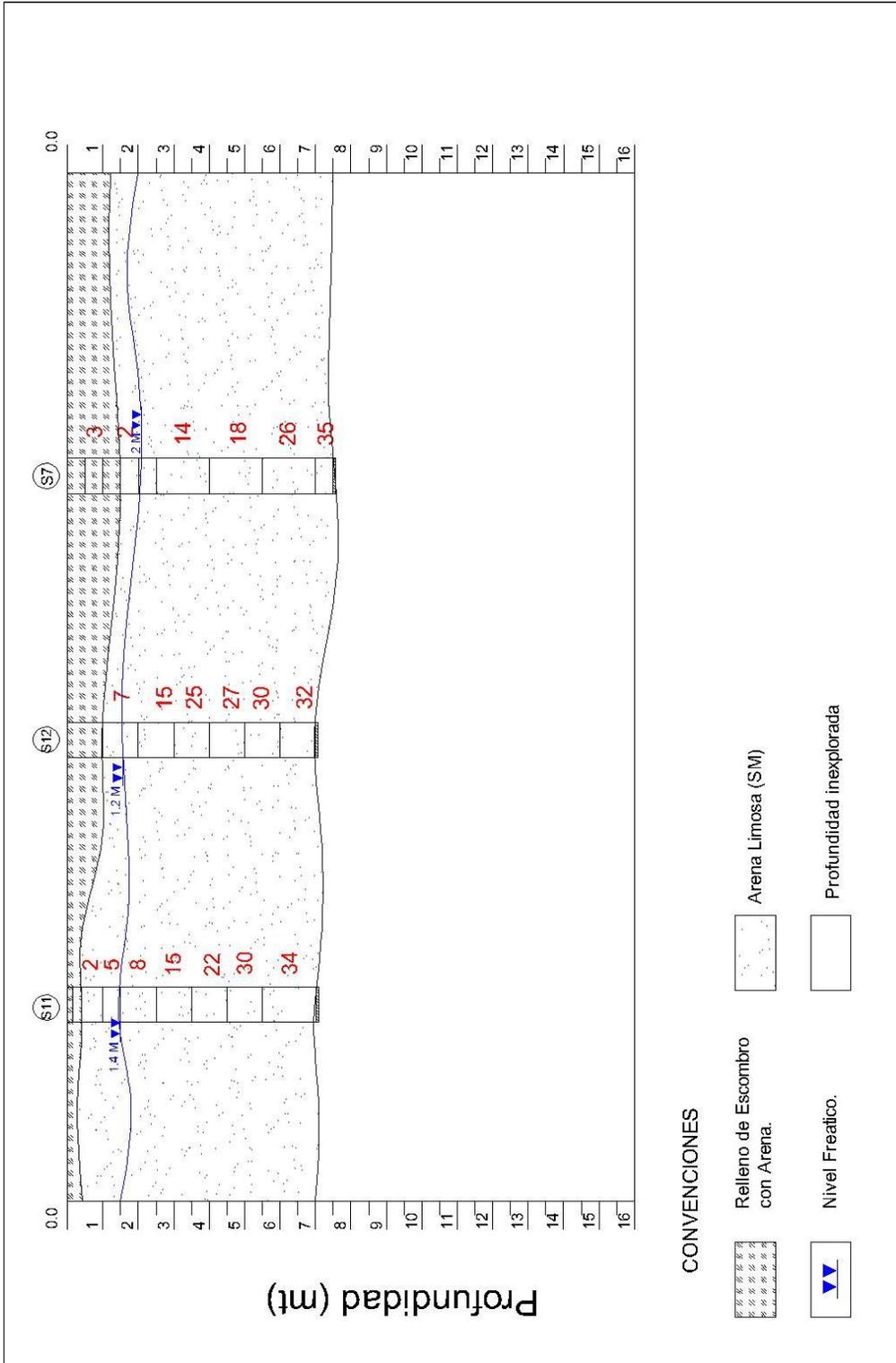


Ilustración 10. Perfil 5 del modelo geológico-geotécnico.

Fuente: Autores.

6.5.2 Planos topográficos de la zona

Adicionalmente se presenta la topografía de la zona en estudio según la profundidad a la que se encontraron escombros, el nivel freático y la profundidad de arenas blandas.

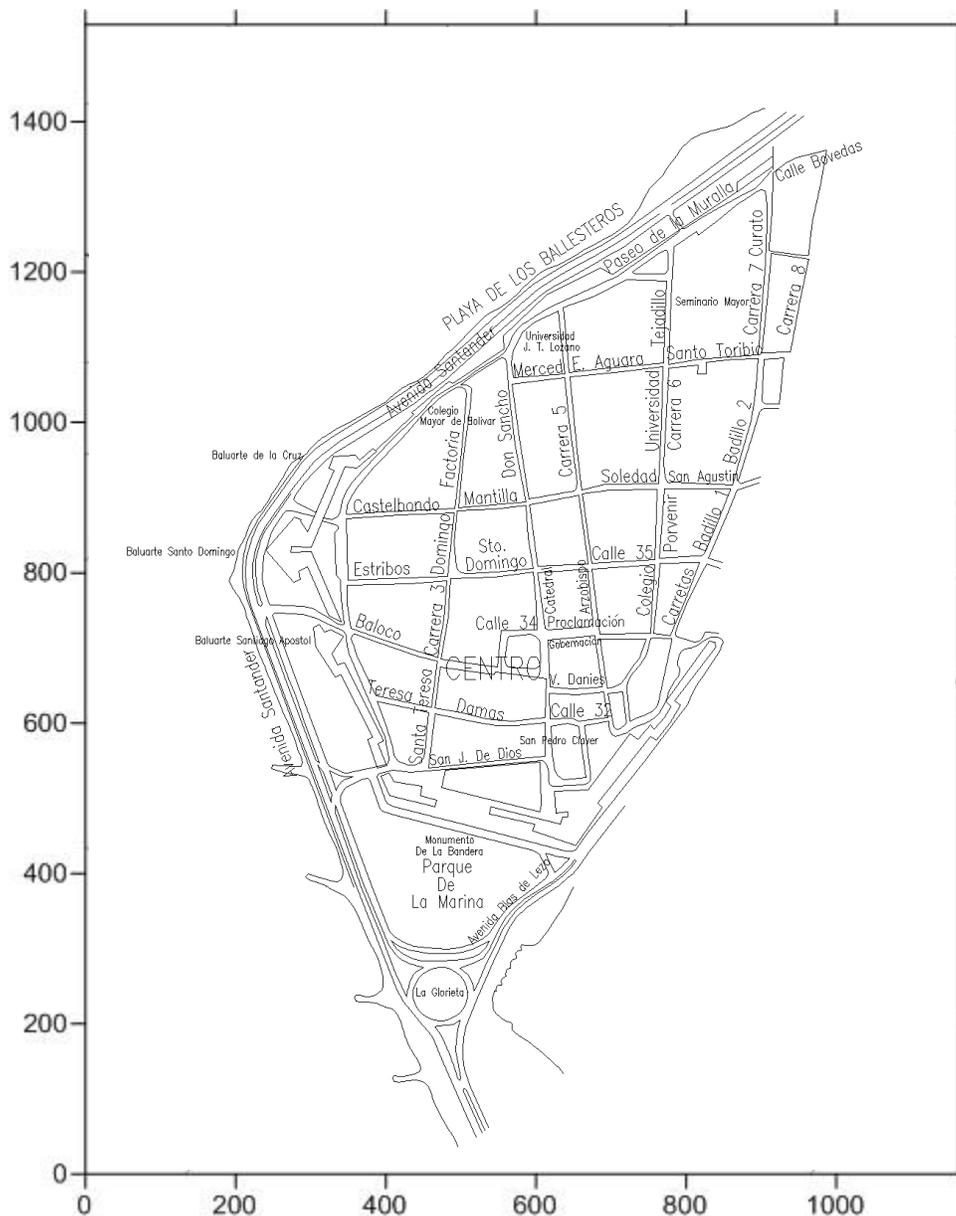


Ilustración 11. Plano general de la zona de estudio.

Fuente: Autores.

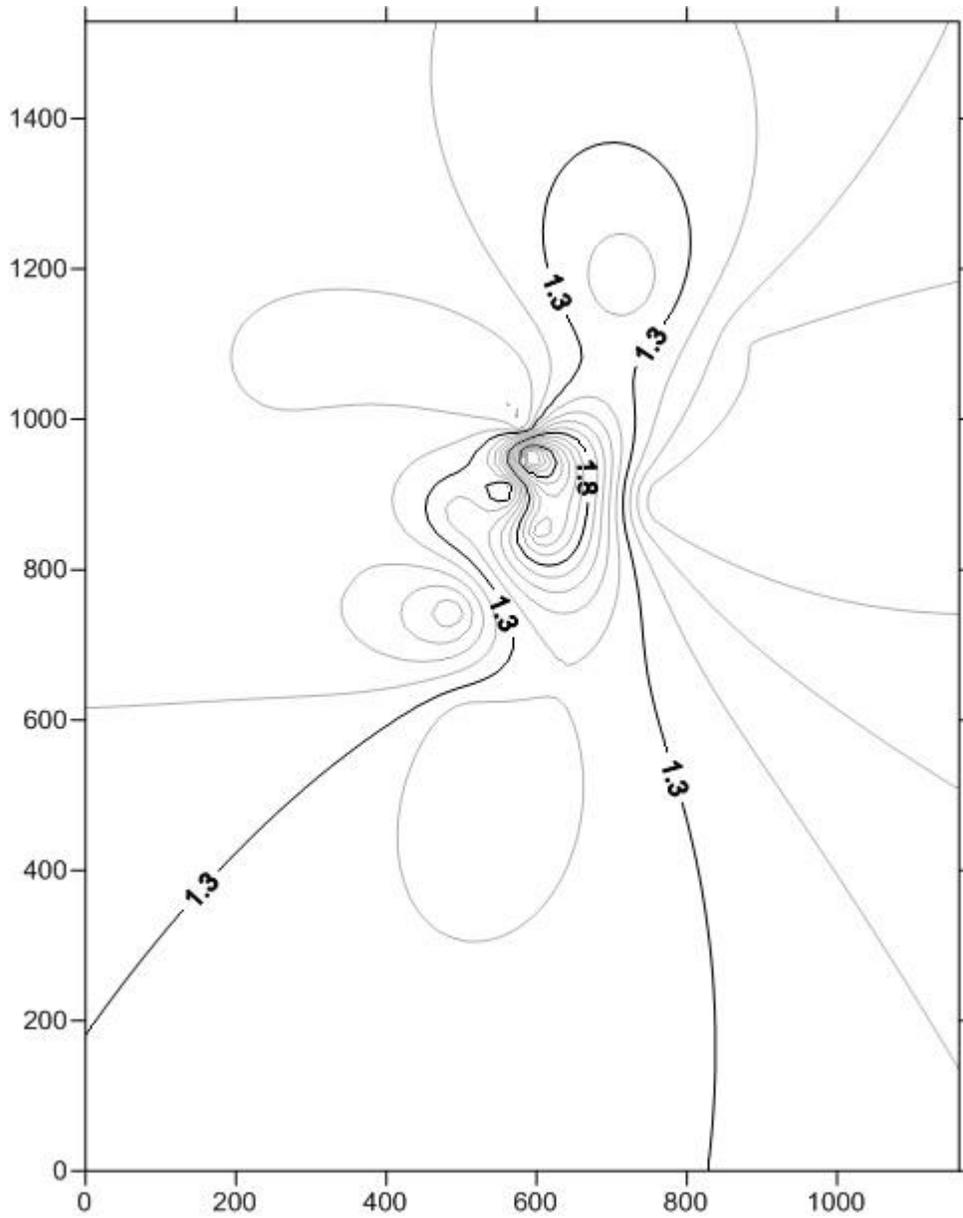


Ilustración 12. Plano topográfico de la profundidad de escombros encontrados.

Fuente: Autores.

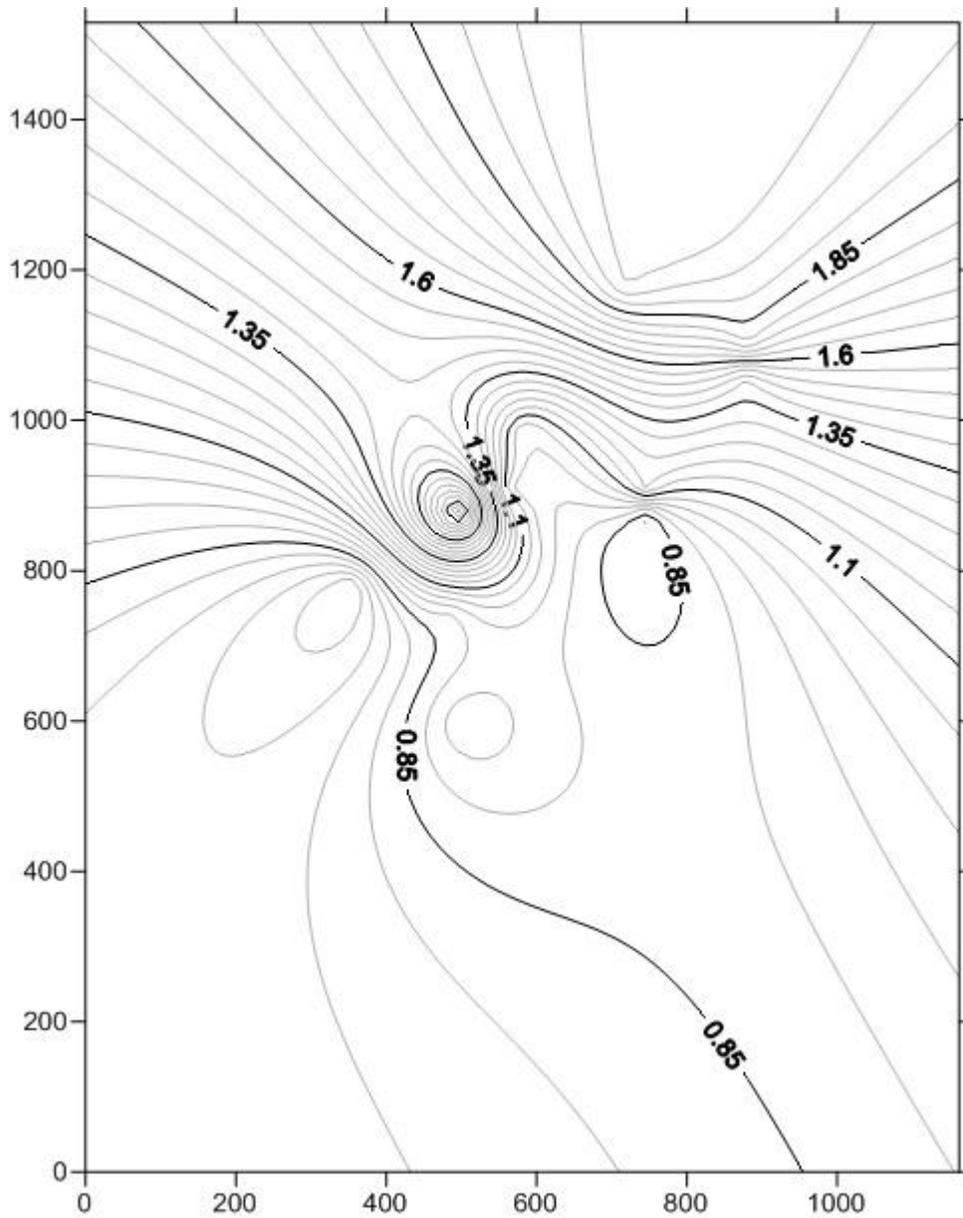


Ilustración 13. Plano topográfico del nivel freático de la zona de estudio.

Fuente: Autores.

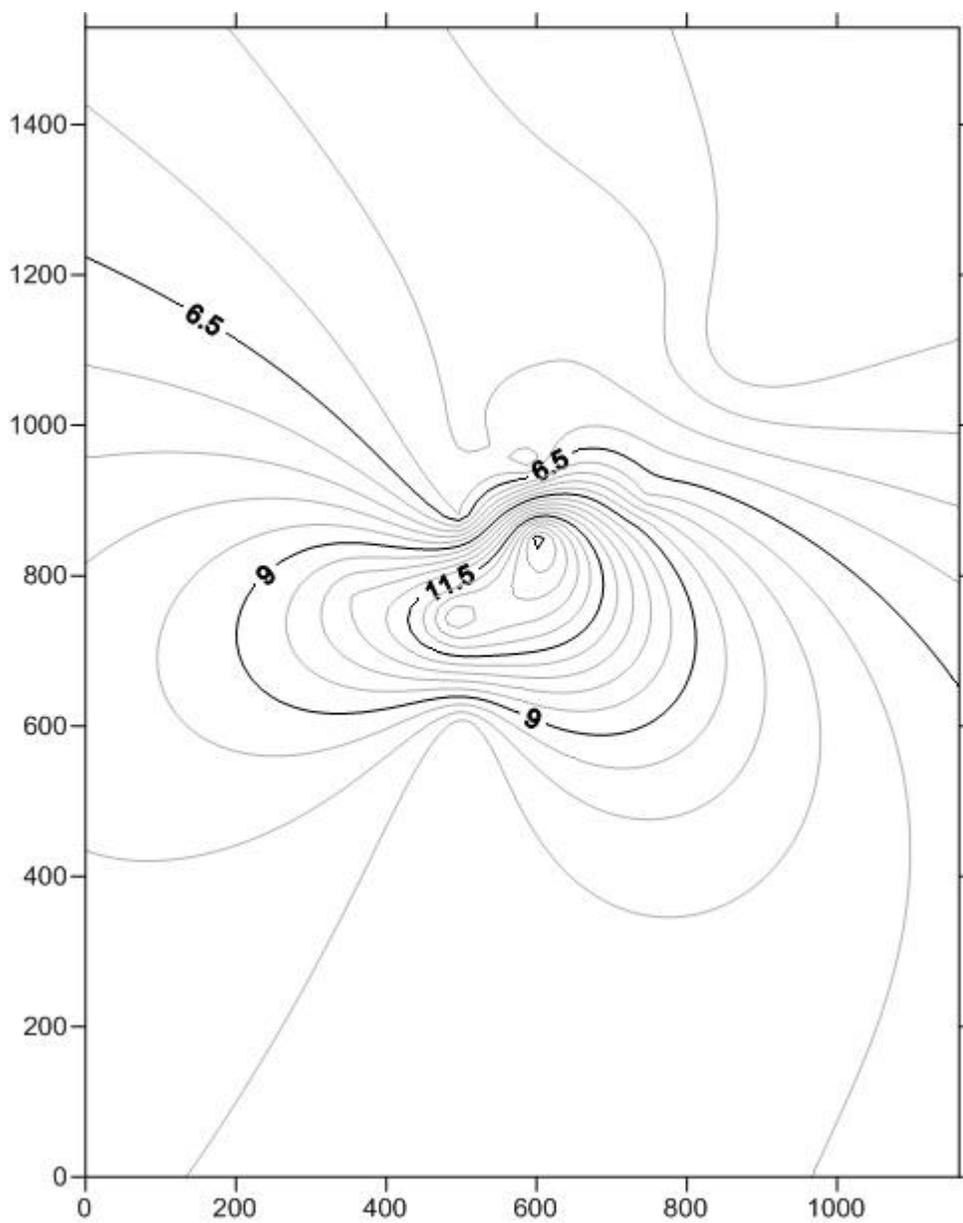


Ilustración 14. Plano topográfico según profundidad de las arenas blandas.

Fuente: Autores.

6.6 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

Para la evaluación del potencial de licuación del suelo de la zona de estudio, se manejaron métodos empíricos basados en los ensayos SPT documentados anteriormente. Para esto se utilizó la metodología propuesta por Kishida y Ohsaki (1969 y 1979) y el Seed et al. (1983).

Se utilizó la tabla 15 proporcionada por el Ingeniero Guilliam Barboza como formato guía, con los parámetros necesarios para determinar si los estratos de los diferentes sondeos obtenidos son potencialmente licuables.

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S2 Nmedido																		
Prof.	N medido	F	IP	NP	Gt	u	σ_v	σ'_v	rd	τ_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(\tau_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condición de licuación	Observaciones
m	golpes/pie	%	%	m	ton/m3	ton/m2	ton/m2	ton/m2										
1.0	2	15.0		0.8	1.41	0.2	1.410	1.2	1.00	0.076	2.293	5.880	9	0.103	0.9	0.085	0.018	No Licuable
2.0	5	15.0		0.8	1.56	1.2	2.970	1.8	1.00	0.109	2.060	5.880	14	0.151	0.9	0.122	0.029	No Licuable
3.0	15	12.0		0.8	1.80	2.2	4.770	2.6	0.99	0.119	1.832	5.396	26	0.289	0.9	0.134	0.155	No Licuable
4.0	15	12.0		0.8	1.80	3.2	6.570	3.4	0.98	0.125	1.666	5.396	24	0.268	0.9	0.140	0.128	No Licuable
5.0	16	10.0		0.8	1.84	4.2	8.410	4.2	0.97	0.127	1.530	5.000	23	0.259	0.9	0.142	0.117	No Licuable
6.0	21	10.0		0.8	1.91	5.2	10.320	5.1	0.96	0.126	1.410	5.000	27	0.302	0.9	0.142	0.160	No Licuable
7.0	21	15.0		0.8	1.91	6.2	12.230	6.0	0.95	0.126	1.310	5.880	27	0.294	0.9	0.141	0.153	No Licuable
8.0	18	15.0		0.8	1.87	7.2	14.100	6.9	0.94	0.125	1.227	5.880	22	0.249	0.9	0.140	0.109	No Licuable
9.0	24	12.0		0.8	1.95	8.2	16.050	7.9	0.93	0.123	1.148	5.396	26	0.289	0.9	0.139	0.151	No Licuable
10.0	24	12.0		0.8	1.95	9.2	18.000	8.8	0.91	0.121	1.078	5.396	25	0.275	0.9	0.136	0.139	No Licuable
10.5	27	10.0		0.8	1.97	9.7	18.985	9.3	0.91	0.120	1.045	5.000	26	0.290	0.9	0.135	0.155	No Licuable

Tabla 15. Formato guía para evaluar el potencial de licuefacción.

Fuente: Guilliam Barboza.

De la tabla anterior se pueden evidenciar parámetros que fueron necesarios para identificar el potencial de licuación de los estratos, tales como:

Numero de golpes (N) y porcentaje de finos (F): Obtenido de los diferentes registros de perforaciones con sus correspondientes ensayos de laboratorio, proporcionados por los ingenieros geotecnistas.

Pesos unitarios (Gt): Parámetro que va en función del número de golpes aplicado a cada estrato.

PESOS UNITARIOS EN FUNCION DE LOS NUMERO DE GOLPES	
Nº de golpes	pesos unitarios
0	1.40
1	1.40
2	1.41
3	1.44
4	1.49
5	1.56
6	1.62
7	1.62
8	1.67
9	1.70
10	1.72
11	1.75
12	1.76
13	1.79
14	1.80
15	1.80
16	1.84
17	1.86
18	1.87
19	1.88
20	1.90
21	1.91
22	1.92
23	1.93
24	1.95
25	1.96
26	1.96
27	1.97
28	1.98
29	1.99
30	2.00
31	2.00
32	2.01
33	2.02
34	2.03
35	2.04
36	2.04
37	2.05
38	2.06
39	2.07
40	2.07

Tabla 16. Pesos unitarios en función del número de golpes.

Fuente: autores.

Presión de poros: La presión de poros está definida como la presión que ejerce un fluido en los espacios porosos de la roca. También es llamada presión de formación o presión poral. (CAVERO, 2010). Se tuvo en cuenta el nivel freático que se presentó en el sondeo, el peso unitario del agua y la profundidad en que se hallaba cada estrato en cuestión.

$$U = (\text{Profundidad} - \text{NP}) * \gamma_w$$

Ecuación 6. Presión de poros

Esfuerzo vertical total (σ_v): Parámetro que se deriva del producto del peso específico del estrato (Gt) y el espesor de este, más el esfuerzo vertical del estrato anterior.

$$\sigma_v = (\text{Gt} * \text{Espesor del estrato}) + \sigma_v \text{ anterior}$$

Ecuación 7. Esfuerzo vertical total.

Esfuerzo vertical efectivo (σ'_v): Se define como la diferencia entre el esfuerzo vertical total y la presión de poros del estrato.

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

Ecuación 8. 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 9. Factor de reducción de esfuerzo.

Relación de los esfuerzos cortantes cíclicos:

$$\frac{T_{prom}}{\sigma'_v} = 0,65 * \frac{amax}{g} * \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} rd$$

Ecuación 10. Relación de los esfuerzos cortantes cíclicos.

Donde amax= Máxima aceleración en el lugar

g=aceleración de la gravedad

Corrección por equipo: En la tabla X se observa los factores utilizados para corrección por equipos.

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
Diámetro 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.		$C_S =$	$1 + \frac{N_{1,60}}{100}$

Tabla 17. Factores para corrección por equipos.

Fuente: (Seed et. al, 2001).

Corrección por presión de confinamiento (C_n):

$$C_n = 1 - 1.41 \text{Log} \left[\frac{\sigma'v}{\sigma'v1} \right]$$

Ecuación 11. Corrección por presión de confinamiento.

Donde: $\sigma'v1 = 1Kg \text{ Cm}2$

Corrección por contenidos de finos (C_f):

$$C_f = 5 * \text{Log}(\%f).$$

Ecuación 12. Corrección por contenido de finos.

Número de golpes corregido ($(N1)_{60}$):

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

Ecuación 13. Numero de golpes corregido.

Coefficiente de resistencia cíclica (CRR):

$$\frac{T_{lic}}{\sigma'v} = 0.0111 * (N1)^{0.60}$$

Ecuación 14. Coeficiente de resistencia cíclica.

Corrección por plasticidad (CP):

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

Ecuación 15. Corrección por plasticidad.

Requisitos de licuación: Para que el suelo presente licuefacción es necesario que el cociente de la relación de los esfuerzos cortantes cíclicos y la corrección por plasticidad sea mayor que el coeficiente de resistencia cíclica.

$$\frac{T_{prom}/(\sigma'v)}{CP} > \frac{T_{lic}}{\sigma'v}$$

Ecuación 16. Requisitos de licuefacción.

6.6.1 Resultados

Basado en los resultados obtenidos en la evaluación del potencial de licuefacción, presentados en los anexos en las tablas 32-44 y graficas 4-16, se evidencia que el sector de San Pedro en el centro histórico de la ciudad de Cartagena, en términos generales no es susceptible a fenómenos de licuefacción, presentando un resultado atípico en el sondeo 6 debido a que los numero de golpes presentados en los ensayos SPT fueron relativamente bajos en algunos estratos, traducándose como estratos con una compacidad relativa baja.

6.7 COMPORTAMIENTO SÍSMICO

A partir de la plataforma online de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), se obtuvo información mediante una consulta experta acerca de los incidentes telúricos registrados desde 1.993 hasta 2.017 en un área circular con radio de 100 km, teniendo como punto de referencia la ciudad de Cartagena (Ilustración 5).

Rango Tiempo					
Fecha Mínima			Fecha Máxima		
Año	Mes	Día	Año	Mes	Día
	01/06/1993			22/10/2017	
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	-66		
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(MI)					
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	700		
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 Maxima	999		
Error Longitud Mínima	0	Error Longitud Maxima	999		
Error Latitud Mínima	0	Error Latitud Maxima	999		
<input type="button" value="Consultar"/>					

Ilustración 15. Consulta experta RSNC.

Fuente: Red Sismológica Nacional Colombiana

Los resultados obtenidos por medio de la consulta experta realizada en la plataforma antes mencionada, muestran los sismos que se presentaron cerca el sector en estudio, junto con su profundidad y magnitud (Ilustración 6).

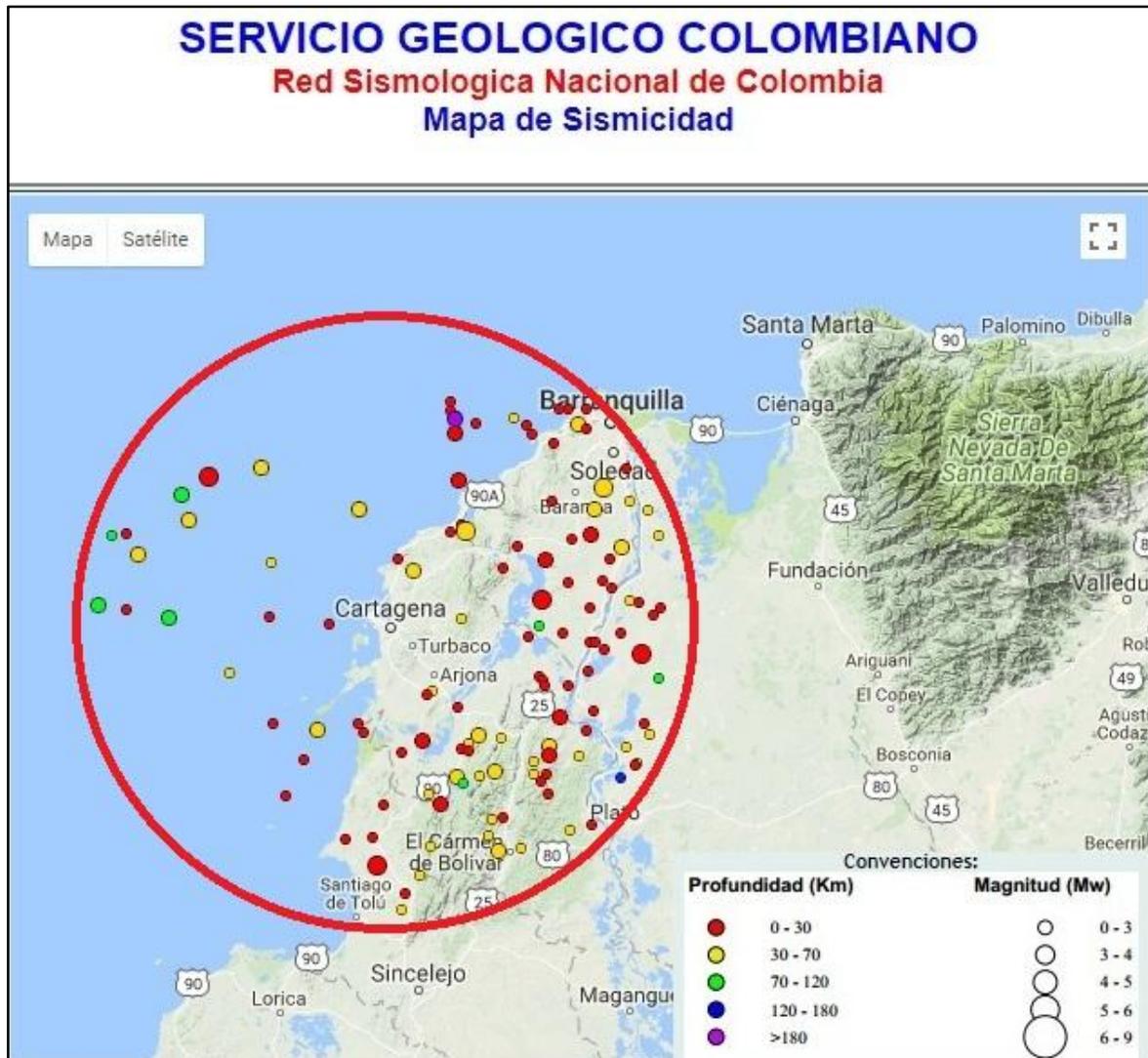


Ilustración 16. Sismos presentados en un radio de 100 Km del sector en estudio entre 1993 y 2017.

Fuente: Red Sismológica Nacional Colombiana

Consecuentemente, se realizó una agrupación estadística en cuanto a la magnitud y la frecuencia de los sismos obtenidos como resultado de la consulta experta (Tabla 18).

Magnitud (ML)	Frecuencia
1.4	3
1.5	4
1.6	2
1.7	3
1.8	7
1.9	8
2	10
2.1	9
2.2	6
2.3	8
2.4	6
2.5	10
2.6	8
2.7	6
2.8	7
2.9	4
3	3
3.1	3
3.2	7
3.3	2
3.4	2
3.5	3
3.6	3
3.7	3
3.8	0
3.9	0
4	1
4.1	0
4.2	2
4.3	2
4.4	0
4.5	1
4.6	3

Tabla 18. Cantidad de sismos por magnitud.

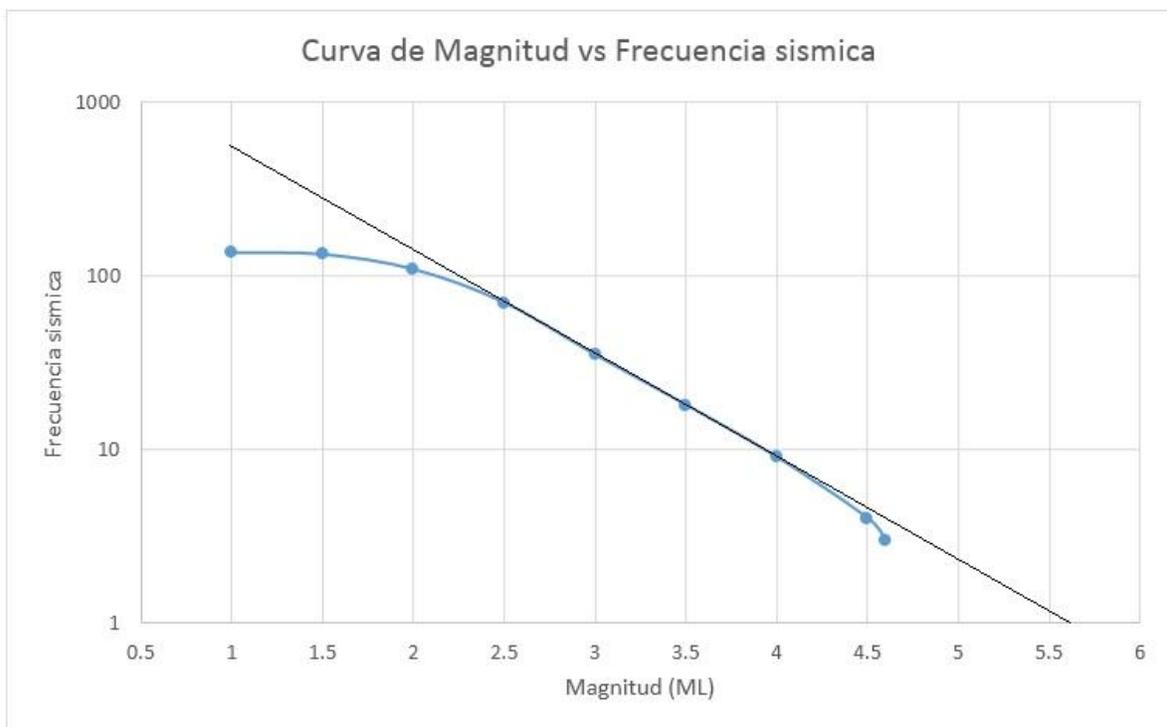
Fuente: Autores

Con la intención de realizar la gráfica de frecuencia vs número de sismos (Grafica 1), se tuvo en cuenta la información de la Tabla 19, la cual muestra la relación entre la magnitud de los sismos y el número de sismos acumulados según la consulta experta.

$\geq ML$	Frecuencia sísmica
1	136
1.5	133
2	109
2.5	70
3	35
3.5	18
4	9
4.5	4
4.6	3

Tabla 19. Frecuencia sísmica acumulada.

Fuente: Autores.



Gráfica 1. Magnitud vs frecuencia sísmica.

Fuente: Autores.

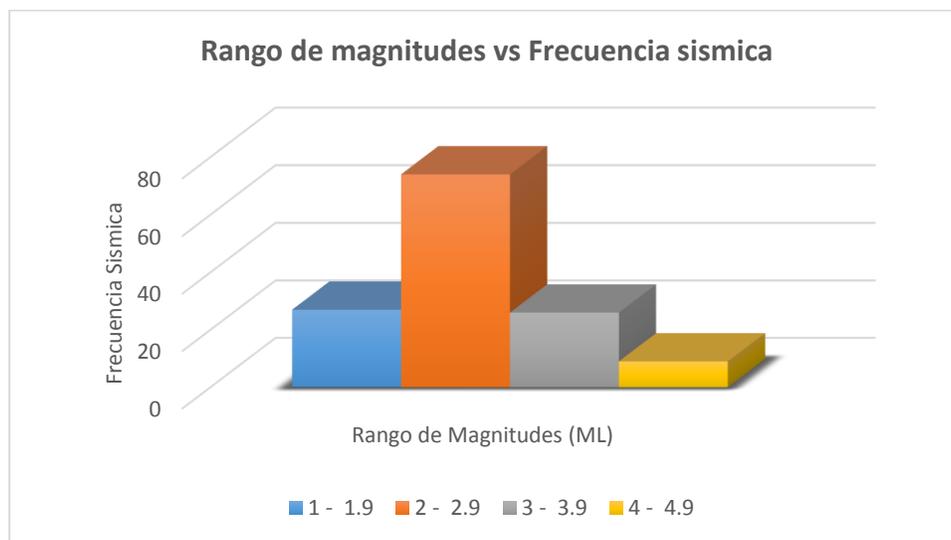
En la Gráfica 1 se observa que los sismos que se podrían presentar en la zona de estudio en el futuro tendrían magnitudes moderadas, dando como magnitud máxima aproximada de 5.7 según la tendencia visible.

A continuación se muestra la tabulación en intervalos (tabla 20) de la información referenciada anteriormente, para identificar cuál es el rango de magnitudes con mayor cantidad de sismos

Rango de Magnitudes (ML)	Frecuencia Sísmica
1 - 1.9	27
2 - 2.9	74
3 - 3.9	26
4 - 4.9	9

Tabla 20. Tabulación de frecuencia sísmica según Intervalos de magnitudes.

Fuente: Autores.



Gráfica 2. Rango de magnitudes vs Frecuencia sísmica

Fuente: Autores.



Gráfica 3. Frecuencia sísmica vs Año de ocurrencia.

Fuente: Autores.

Se puede inferir de la tabla 20 y la gráfica 2, que la mayor cantidad de sismos que se han presentado en un radio de 100 Km con respecto a la zona de estudio desde el año 1993 hasta la actualidad, se encuentran en una magnitud entre 2 y 2.9 ML, por lo que se evidencia el bajo riesgo sísmico en el que se encuentra la ciudad de Cartagena. Asimismo en la Grafica 3 se puede observar la cantidad de sismos que se han presentado con el transcurrir del tiempo desde 1993 hasta la actualidad, presentándose un aumento considerable de este fenómeno entre 2009 y 2015.

6.8 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE (VS)

La Velocidad de onda de corte (V_s) puede determinarse por medio de diferentes correlaciones propuestas por diferentes investigadores como por ejemplo: Ohta y Goto, Okamoto, Japan Road Association, entre otros. En el caso del presente proyecto, se tomó como referencia la ecuación propuesta por Okamoto, la cual evalúa la velocidad de onda de corte en base al número de golpes obtenidos de los estudios de suelos.

$$V_s = 125N^{0,3}$$

Ecuación 17. Ecuación de Okamoto et al. (1989).

En la siguiente tabla se enuncian las correlaciones propuestas por los investigadores.

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)	$V_s = 85.34N^{0,348}$	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		

Tabla 21. Correlaciones para determinar la velocidad de onda de corte.

Fuente: (Castillo, 2007).

6.8.1 Velocidad de onda de corte de los perfiles.

PERFIL 1					
SONDEO 1			SONDEO 10		
N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6.65	1.0	220.7	8.8	1.0	240.1
11.06	2.0	257.1	13.9	2.0	275.0
16.21	3.0	288.3	26.3	3.0	333.4
19.04	4.0	302.6	17.9	4.0	296.8
22.38	5	317.6	22.4	5	317.7
			24.7	6	327.0
Promedio		277.2	Promedio		298.3
SONDEO 4			SONDEO 3		
N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.9	1.0	262.7	0.0	1.0	0.0
11.2	2.0	257.9	0.0	2.0	0.0
14.6	3.0	279.3	14.3	3.0	277.5
13.9	4.0	275.3	13.4	4.0	272.4
16.5	5	290.1	18.5	5	300.0
22.2	6	316.8	31.8	6	353.0
20.7	7	310.5	24.9	7	328.1
24.4	7.5	325.8	21.3	8	312.8
			17.0	9	292.3
			11.4	10	259.6
			11.4	11	259.1
			11.6	12	261.1
			11.7	13	261.3
			11.6	14	260.8
			29.6	15	345.2
			19.6	16	305.4
Promedio		289.8	Promedio		255.5

Tabla 22. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 1.

Fuente: Autores.

PERFIL 2								
SONDEO 8			SONDEO 9			SONDEO 5		
N	Okamoto		N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11.9	1.0	262.8	6.7	1.0	220.7	10.2	1.0	251.1
15.9	2.0	286.7	10.8	2.0	255.5	12.1	2.0	263.9
18.9	3.0	302.1	21.3	3.0	313.0	22.4	3.0	317.5
17.2	4.0	293.6	26.9	4.0	335.6	20.3	4.0	308.3
21.1	5	312.1	28.4	5	341.0	12.8	5	268.8
20.8	6	310.7	29.0	6	343.4	13.9	6	275.5
			28.8	7	342.5	13.6	7	273.7
			28.3	8	340.7	17.3	8	294.2
						13.3	9	271.5
						13.3	10	271.5
						50.7	11	406.0
						38.3	12	373.0
						19.8	13	306.1
						22.3	14	317.3
						23.7	15	323.3
Promedio		294.7	Promedio		311.6	Promedio		301.4

Tabla 23. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 2.

Fuente: Autores.

PERFIL 3								
SONDEO 6			SONDEO 5			SONDEO 3		
N	Okamoto		N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8.8	1.0	239.7	10.2	1.0	251.1	0.0	1.0	0.0
10.8	2.0	255.1	12.1	2.0	263.9	0.0	2.0	0.0
10.6	3.0	253.9	22.4	3.0	317.5	14.3	3.0	277.5
9.9	4.0	248.5	20.3	4.0	308.3	13.4	4.0	272.4
18.0	5	297.3	12.8	5	268.8	18.5	5	300.0
10.6	6	253.7	13.9	6	275.5	31.8	6	353.0
10.5	7	253.3	13.6	7	273.7	24.9	7	328.1
9.1	8	242.3	17.3	8	294.2	21.3	8	312.8
7.2	9	225.8	13.3	9	271.5	17.0	9	292.3
6.4	10	218.5	13.3	10	271.5	11.4	10	259.6
24.6	10.5	326.9	50.7	11	406.0	11.4	11	259.1
			38.3	12	373.0	11.6	12	261.1
			19.8	13	306.1	11.7	13	261.3
			22.3	14	317.3	11.6	14	260.8
			23.7	15	323.3	29.6	15	345.2
						19.6	16	305.4
Promedio		255.9	Promedio		301.4	Promedio		255.5

Tabla 24. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 3.

Fuente: Autores.

PERFIL 4								
SONDEO 12			SONDEO 7			SONDEO 2		
N	Okamoto		N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8.4	1.0	236.8	8.4	1.0	236.8	9.3	1.0	244.2
10.1	2.0	249.9	7.7	2.0	230.2	13.6	2.0	273.6
13.6	3.0	273.7	22.0	3.0	315.9	26.0	3.0	332.2
18.6	4.0	300.2	20.2	4.0	308.1	24.1	4.0	324.9
24.0	5.0	324.3	23.5	5.0	322.2	23.4	5	321.7
27.5	6.0	337.7	29.8	6.0	346.2	27.2	6	336.8
27.7	7.0	338.7	28.1	7.0	340.1	26.5	7	334.1
			35.1	7.5	363.5	22.4	8	317.9
						26.1	9	332.4
						24.8	10	327.5
						26.2	10.5	332.9
Promedio		294.5	Promedio		307.9	Promedio		316.2

Tabla 25. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 4.

Fuente: Autores.

PERFIL 5								
SONDEO 13			SONDEO 11			SONDEO 7		
N	Okamoto		N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16.3	1.0	288.8	6.8	1.0	222.1	8.4	1.0	236.8
14.3	2.0	277.6	15.6	2.0	285.2	7.7	2.0	230.2
22.6	3.0	318.6	23.9	3.0	324.0	22.0	3.0	315.9
32.4	4.0	354.8	29.8	4.0	346.0	20.2	4.0	308.1
31.8	5.0	353.0	36.7	5.0	368.4	23.5	5.0	322.2
33.3	6.0	357.7	37.7	6.0	371.3	29.8	6.0	346.2
33.1	7.0	357.1	35.0	7.0	363.2	28.1	7.0	340.1
						35.1	7.5	363.5
Promedio		329.7	Promedio		325.8	Promedio		307.9

Tabla 26. Velocidad de onda de corte de sondeos del Perfil 5.

Fuente: Autores.

6.9 CLASIFICACIÓN DEL PERFIL DE SUELO.

Para determinar la clasificación del perfil del suelo del sector San Pedro del centro histórico de Cartagena, se utilizó la velocidad de onda de corte promedio de cada sondeo y la tabla A2.4-1 (Clasificación de los perfiles de suelo) de la norma NSR-10.

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca Competente	$V_s > 1500$ m/s
B	Perfil de roca de cualquier espesor	1500 m/s $> V_s > 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante	760 m/s $> V_s > 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, de cualquier espesor que cumpla con cualquiera de los dos criterios	$N > 50$, o $S_u > 100$ kPa (~ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante	360 m/s $> V_s > 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos de cualquier espesor que cumpla cualquiera de las dos condiciones	$50 > N > 15$, o 100 kPa (~ 1 kgf/cm ²) $> S_u > 50$ kPa (~ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil de cualquier espesor que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante	180 m/s $> V_s$
	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $W > 40\%$ 25 kPa (~ 0.25 kgf/cm ²) $> S_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases. F1 – Suelos vulnerables a la falla o colapso causado por una excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2 – Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3 – Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75) F4 – Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Tipo de Perfil	Vs	N o N _{ch}	Su
C	Entre 360 y 760 m/s	Mayor que 50	Mayor que 100 Kpa (~ 1.0 kgf/cm ²)
D	Entre 180 y 360 m/s	Entre 15 y 50	Entre 100 y 50 Kpa (~ 0.5 a 1.0 kgf/cm ²)
E	Menor de 180 m/s	Menor de 15	Menor de 50 Kpa (~ 0.5 kgf/cm ²)

Tabla 27. Clasificación del perfil de suelo.

Fuente: NSR-2010.

En base a los sondeos recopilados se obtiene que el perfil del suelo del sector de San Pedro es de tipo D, debido a que el promedio de las velocidades de onda de corte es de 296.8 m/s, valor que se encuentra en un rango entre 180 m/s y 360 m/s.

6.10 PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN

El periodo fundamental de vibración del suelo (T_s) basado en la ecuación de Newmark y Rosenbleuth (1976), se estima tomando como parámetros el espesor del i -ésimo estrato (h_i) y la velocidad de propagación de ondas de corte (β_i) donde el número de estratos está representado por n .

$$T_s = 4 \sum_i^n \frac{h_i}{\beta_i}$$

Ecuación 18. Periodo fundamental de vibración

(Newmark N. y Rosenbleuth E., 1976).

Para obtener un resultado óptimo, el periodo fundamental de vibración es recomendable calcularlo utilizando sondeos con profundidades relativamente grandes y omitir las pequeñas dado que solo evalúan estratos de suelo superficial. Es por esto que se tuvo en cuenta solo los ensayos que presentaban profundidades considerables.

A continuación se presenta en la tabla 28 los sondeos que se tuvieron en consideración a la hora de calcular el periodo fundamental de vibración del sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena.

SONDEO 6			SONDEO 2		
N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8.8	1.0	239.7	9.3	1.0	244.2
10.8	2.0	255.1	13.6	2.0	273.6
10.6	3.0	253.9	26.0	3.0	332.2
9.9	4.0	248.5	24.1	4.0	324.9
18.0	5	297.3	23.4	5	321.7
10.6	6	253.7	27.2	6	336.8
10.5	7	253.3	26.5	7	334.1
9.1	8	242.3	22.4	8	317.9
7.2	9	225.8	26.1	9	332.4
6.4	10	218.5	24.8	10	327.5
24.6	10.5	326.9	26.2	10.5	332.9
Promedio		255.9	Promedio		316.2
SONDEO 3			SONDEO 5		
N	Okamoto		N	Okamoto	
	Profundidad (m)	Velocidad (m/s)		Profundidad (m)	Velocidad (m/s)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	1.0	0.0	10.2	1.0	251.1
0.0	2.0	0.0	12.1	2.0	263.9
14.3	3.0	277.5	22.4	3.0	317.5
13.4	4.0	272.4	20.3	4.0	308.3
18.5	5	300.0	12.8	5	268.8
31.8	6	353.0	13.9	6	275.5
24.9	7	328.1	13.6	7	273.7
21.3	8	312.8	17.3	8	294.2
17.0	9	292.3	13.3	9	271.5
11.4	10	259.6	13.3	10	271.5
11.4	11	259.1	50.7	11	406.0
11.6	12	261.1	38.3	12	373.0
11.7	13	261.3	19.8	13	306.1
11.6	14	260.8	22.3	14	317.3
29.6	15	345.2	23.7	15	323.3
19.6	16	305.4			
Promedio		255.5	Promedio		301.4

Tabla 28. Resumen de los sondeos utilizados para determinar el Ts.

En base a las velocidades promedio obtenidas de los sondeos que se muestran en la tabla 29, se procedió a determinar los periodos fundamentales de vibración de cada sondeo y posteriormente se calculó el periodo fundamental de vibración promedio.

	SONDEO 2	SONDEO 3	SONDEO 5	SONDEO 6
Vs Prom (m/s)	316.2	255.5	301.4	255.9
Profundidad (m)	10.5	16	15	10.5
Ts del sondeo	0.134	0.194	0.202	0.168
Ts Prom	0.17			

Tabla 29. Periodo fundamental de vibración para sondeos de mayores profundidades.

Se calculó un periodo fundamental de vibración promedio del suelo de 0,17 segundos. Debido a esto se recomienda que las estructuras ubicadas en el sector en estudio no presenten periodos iguales o similares al periodo de vibración del suelo para evitar el fenómeno de resonancia.

6.11 SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LAS CASAS COLONIALES

En su libro “La Casa Colonial Cartagenera”, el Sr. Javier Covo Torres especifica: *“La construcción en Cartagena de indias no fue hecha por arquitectos, sino por carpinteros y alarifes que trabajaban buscando unos propósitos diferentes a los que perseguía la arquitectura culta en la época.*

Entre la arquitectura culta que se hacía en España (llenas de influencias islámicas, italianas y francesas) y la arquitectura que aparece en el nuevo mundo, surge un núcleo social de artesanos emigrantes que pertenecen a la baja burguesía española. El constructor español en Cartagena sustituye materiales europeos por otros de la región y poco a poco va usando técnicas indígenas en la labor constructiva de claro origen europeo.”

Además, describe tres tipologías de casas que predominaban en la época: La casa baja, la casa intermedia y la casa alta, siendo esta última la que prevalece en el sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena. Dichas casas comúnmente son de dos plantas con entresuelo las cuales poseen muros estructurales constituidos de tres formas:

- A. De piedra y argamasa de cal.
- B. De pedazos de ladrillo, piedra y coral triturado (que forma con la argamasa una mezcla muy compacta).
- C. De ladrillo tolete o en otros casos ladrillo tablón; muchas veces este muro se fabricaba mezclado con retal de coral y siempre se utilizaba una junta gruesa de argamasa.

Los anchos más habituales presentes en los muros se encontraban entre 0.428 y 1.28m.

En cuanto a las cubiertas de las casas del sector, los tipos de cubierta que más se utilizaron fueron “par e hilera” y “par y nudillo”. Estas cubiertas se caracterizan por su estabilidad y la buena calidad de los materiales empleados en su construcción, aunque esto no las exime de ser susceptibles a daños ante la ocurrencia de un suceso, debido a que las cubiertas de las edificaciones del sector se encuentran mal enlazadas con los muros ortogonales. . (Ospino M. & Torres M., 2016).

Con relación a los pisos, el piso bajo encontrado al nivel de la calle por lo general se le daba una terminación en ladrillo “Plano” o “Tablón”, aunque en las casas amplias se utilizó el piso de piedra en el zaguán y el vestíbulo; en el piso alto y los entresuelos lo que se hacía era apoyar las vigas de madera sobre los muros, y sobre estas se colocaban unos tablones los cuales se cubrían con una capa gruesa de argamasa para luego instalar las baldosas ó en otros casos solo se colocaban los tablones y se pulían.

Por otra parte, en las casas coloniales también se usaron arcadas separándose en dos tipos: el más usado fue de arcos apoyados sobre columnas de piedra coralina y el menos usado se basó en arcos apoyados sobre pilastras o machones de piedra o mampostería. (Covo T., 1988).

6.11.1 Periodo fundamental de vibración promedio de las casas del sector.

El periodo fundamental de vibración aproximado, se calculó basado en la ecuación 19 la cual depende de parámetros que se apoyan en el tipo de sistema estructural y en la altura de la edificación.

$$T_a = C_t h^\alpha$$

Ecuación 19. Ecuación A.4.2-3. Periodo fundamental de vibración aproximado.

Fuente: (NSR-10)

Sistema estructural de resistencia sísmica	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.072	0.8
Pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo.	0.073	0.75
Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería	0.049	0.75
Alternativamente, para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, pueden emplearse los siguientes parámetros C_t y α , donde C_w se calcula utilizando la ecuación A.4.2-4.	$\frac{0.0062}{\sqrt{C_w}}$	1.00

Tabla 30. Tabla A.4.2-1 (Valor de los parámetros C_t y α para el cálculo del período aproximado T_a)

Fuente: NSR-10

Al tener presente el sistema constructivo (basado comúnmente en muros de pedazos de ladrillo, piedra y coral triturado) que se utilizó en las casas coloniales de Cartagena, más específicamente en el sector San Pedro, se utilizan los valores de la tabla 30 referentes a “*Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería*”, y al haber determinado que el tipo de casa más común en el sector es la casa alta la cual tiene una altura que oscila entre 9 y 15 mt, se puede hallar el período fundamental aproximado para diferentes alturas de las casas del sector.

A continuación en la tabla 31 se evidencian los períodos fundamentales aproximados para las alturas más comunes de las casas en la zona.

Altura	T_s
9	0.25
10	0.28
11	0.30
12	0.32
13	0.34
14	0.35
15	0.37

Tabla 31. Períodos fundamentales de vibración para alturas comunes en el sector

Fuente: Autores.

7. CONCLUSIONES.

- ❖ Basado en la caracterización geotécnica realizada se puede inferir:
 - ✓ El nivel freático se encontró habitualmente a profundidades de 1 metro con pequeñas variaciones.
 - ✓ Generalmente en los primeros dos metros se presentaron rastros de relleno de escombros con arena limosa muy suelta.
 - ✓ Al analizar los datos contenidos en los registros de perforaciones se obtuvo que el tipo de estrato de suelo que predomina en el sector en estudio está compuesto por arena limosa (SM) y en menor proporción estratos de arena limosa mal gradada (SM-SP), encontrándose en ciertos casos rastros de caracolejo, caracuchas menudas y piedra pómez.
 - ✓ Los pesos unitarios de los estratos registrados en los sondeos oscilan entre 1.40 tn/m³ y 2.04 Tn/m³
- ❖ En concordancia con los resultados obtenidos en los estudios realizados por Toral y Herrera & Escorcía llamados “Caracterización geotécnica del sub-suelo que constituyen el Centro Histórico de la ciudad de Cartagena y evaluación de su comportamiento sísmico, sector san diego” y “Caracterización geotécnica del subsuelo y evaluación sísmica en el sector Getsemaní en la ciudad de Cartagena de Indias” respectivamente, se concluye con ayuda del análisis de licuefacción de suelos propio, que en general el subsuelo del centro histórico no es susceptible a fenómenos de licuefacción. Sin embargo, se presentó un resultado atípico en el sondeo 6 debido a que los números de golpes encontrados en los ensayos SPT fueron relativamente bajos en algunos estratos, traduciéndose como estratos con una compacidad relativa baja.

- ❖ Se evidenció en los registros del RSNC que a partir de 1993 hasta la actualidad se han presentado sismos con magnitudes entre 1.4 y 4.6 grados en la escala de Richter dentro de un radio de 100 km alrededor de Cartagena, encontrándose mayor recurrencia en el rango de 2 a 2.9 grados.

Se pudo observar la cantidad de sismos que se han presentado con el transcurrir del tiempo desde 1993 hasta la actualidad, presentándose un aumento considerable de este fenómeno entre 2009 y 2015. Además los sismos que se podrían presentar en la zona de estudio en el futuro tendrían magnitudes moderadas, dando como magnitud máxima aproximada de 5.7 según la tendencia.

En síntesis, se evidencia el bajo riesgo sísmico en el que se encuentra la ciudad de Cartagena en concordancia con lo reflejado en la Norma Sismo Resistente Colombiana actual (NSR-10).

- ❖ La velocidad de onda de corte (V_s) es un parámetro importante en la evaluación del comportamiento sísmico de los suelos, mediante el cual se puede identificar el tipo de suelo según la tabla A.2.4-1 de la Norma Colombiana Sismo Resistente (NSR-10).

En base a los sondeos recopilados se obtuvo que el perfil del suelo del sector de San Pedro es de tipo D, debido a que el promedio de las velocidades de onda de corte es de 296.8 m/s, valor que se encuentra en un rango entre 180 m/s y 360 m/s.

- ❖ Se calculó un periodo fundamental de vibración promedio del suelo de 0,17 segundos. Debido a esto se recomienda que las estructuras ubicadas en el sector en estudio no presenten periodos iguales o similares al periodo de vibración del suelo para evitar el fenómeno de resonancia, en el que tanto el suelo como la estructura oscilan en una forma sincronizada, causando que la estructura se vea sometida a mayores esfuerzos.
- ❖ Se evidenció que la tipología de casas coloniales más frecuente en el sector San Pedro del centro histórico de la ciudad de Cartagena de Indias ha de ser la casa alta. Estas casas

comúnmente están constituidas por muros hechos de pedazos de ladrillo, piedra y coral triturado. Además la altura de estas oscila entre 9 y 15 metros de altura.

A partir de esta información se determinó el periodo fundamental de vibración aproximado (T_a) de estas casas en base a las alturas que normalmente se presentan en el sector, y con ayuda de la A.4.2-1 (Valor de los parámetros C_t y α para el cálculo del período aproximado T_a) de la norma sismo resistente colombiana. Obteniendo como resultados periodos relativamente alejados del periodo fundamental de vibración aproximado del suelo, por lo que se constata la baja probabilidad de presentarse el fenómeno de resonancia en el sector.

- ❖ En síntesis, se justifica la realización de estudios de este tipo que permitan conocer el comportamiento del subsuelo en lugares de gran importancia social y aquellos propensos a movimientos sísmicos para poder tomar medidas correctivas o en su defecto establecer recomendaciones para las posibles restauraciones o rehabilitaciones en las edificaciones existentes.

8. RECOMENDACIONES

A partir de la necesidad de aminorar los posibles perjuicios originados por un sismo a la infraestructura de la zona, se presentan algunas recomendaciones de prevención de daños a futuros eventos sísmicos que podrían producirse en la zona de estudio.

- ❖ Mejoramiento del suelo por medio de métodos como lo son inyecciones de elementos químicos e inyecciones de compactación, debido a que estos métodos permiten ser aplicados a obras existentes sin la utilización de vibración o el incamio de pilotes que afecten la estabilidad de obras colindantes. El primer método consiste en inyección a presión de elementos químicos cementantes al depósito arenoso grueso y el segundo consiste en inyecciones paulatinas de mortero seco, el cual al expandirse se desplaza y compacta el terreno aumentando así la densidad relativa y la resistencia al mismo tiempo que disminuye la permeabilidad del suelo.
- ❖ Aplicación de drenajes, sub drenajes de grava, gravilla, drenajes tipo "Mecha" y pozos que permitan mantener baja la presión del agua y controlar posibles excesos.
- ❖ Se propone realizar estudios de vulnerabilidad sísmica y patología que permitan identificar las posibles afecciones que puedan incrementar los efectos destructivos sobre las edificaciones en caso de un evento sísmico.
- ❖ Basado en la escases en la cantidad de sondeos y grandes profundidades evidenciada en este trabajo como una limitación, se les recomienda a los posibles estudios similares que se pretenda realizar, la recopilación exhaustiva de mayor cantidad de estudios de suelos en su zona de estudio, priorizando aquellos que sean de gran profundidad ya que permiten tener resultados más detallados y conclusiones más específicas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, F. (2013). *COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE RIESGO DE LICUEFACCIÓN Y LOS CATASTROS REALIZADOS LUEGO DEL TERREMOTO DE 2010 EN CONCEPCIÓN.*
- Ana Paula. (2012). *HISTORIA SISMICA DE COLOMBIA.* Obtenido de <http://acontecimientos2012.latin-foro.net/t4904-historia-sismica-de-colombia>
- ASTM D 1586. (s.f.).
- BANCO MUNDIAL. (2012). *Resumen ejecutivo. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas.*
- Cardona, O. D. (S.f.). Sistema Nacional Para la Prevención y Atención de desastres de Colombia. 3.
- Cartagena Caribe. (2015). *www.CartagenaCaribe.com.* Obtenido de <http://www.Cartagenacaribe.com/general/Cartagena-colombia.htm>
- Castillo, A. (2007). *Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá - Colombia.* Bogotá.
- CAVERO, C. (2010). *ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE PRESIÓN DE POROS APLICADO A LA ESTABILIDAD DE POZOS DE PERFORACIÓN PETROLERA.* Lima-Perú.
- Centro de Sismología Universidad de Oriente. (2012). *Origen de los terremotos.* Obtenido de <http://sismologico.udo.edu.ve/temas-de-interes/origen-de-los-terremotos.html>.
- Collarte & Poblete. (2004). *ESTIMACIÓN DE LA HISTORIA DE PRECARGA CÍCLICA DE UN SUELO, CON AYUDA DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN.*
- Covo T., J. (1988). *La casa colonial Cartagenera.* Bogotá: El Áncora Editores.
- FAO, O. d. (s.f.). *Clasificación de Suelos.* Obtenido de [www.fao.org: http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/)
- FAO, O. d. (s.f.). *Clasificación de Suelos.* Obtenido de [www.fao.org: http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/es/)
- Gonzalez Raynal, B. E. (s.f.). *MICROZONIFICACION SISMICA Y SU UTILIZACION EN LA REDUCCION DEL RIESGO SISMICO EN CUBA.*
- Google Maps. (2017). <https://maps.google.es/>. Obtenido de <https://www.google.es/maps/place/Cartagena,+Bol%C3%ADvar,+Colombia/@10.4229447,-75.5482753,15z/data=!4m5!3m4!1s0x8ef625e7ae9d1351:0xb161392e033f26ca!8m2!3d10.3910485!4d-75.4794257>

- <http://www.bibliocad.com>. (s.f.). <http://www.bibliocad.com>. Obtenido de http://www.bibliocad.com/biblioteca/plano-cartagena--colombia_7101
- INGEOMINAS. (2000). *ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA, APTITUD Y USO DEL SUELO EN EL CASCO URBANO DE CARTAGENA*.
- Lantada Zarsosa, M. N. (2007). *EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO MEDIANTE MÉTODOS AVANZADOS Y TÉCNICAS GIS, APLICACIÓN A LA CIUDAD DE BARCELONA*. Barcelona.
- Leoni, A. (S.F). *PROCESOS DE LICUEFACCIÓN DE SUELO*.
- LÓPEZ SÁNCHEZ, G. (2015). *¿Por qué se producen los terremotos?* Obtenido de <http://www.abc.es/ciencia/20150223/abci-causa-terremotos-201502232012.html>.
- Newmark, N. &. (1976). *Fundamentos de ingeniería sísmica 1° ed*. Mexico D.F.
- NSR. (2010). *Norma Sismo Resistente Colombiana - Título A*.
- Obando, T. (2009). *Metodología y técnicas para la Cuantificación del potencial de licuación en suelos sujetos a sollicitaciones dinámicas. Ejemplos de casos*.
- Ospino M. & Torres M. (2016). *VULNERABILIDAD DE CASAS ALTAS DE TIPO COLONIAL UBICADAS EN EL CENTRO HISTÓRICO DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*. Cartagena.
- Quesada, F. B. (2008). *Evaluación del Potencial de Licuefacción en Suelos*.
- Rosenberg, M. (2017). *Ring of Fire*.
- RSNC. (s.f.). RSNC. Obtenido de <http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/respuesta.php>
- Stokoe K.H. II, R. G. (1989). *“In-Situ seismic testing with surface waves”*. Río de Janeiro, Brasil.
- Toral, J. (2016). *Caracterización geotécnica del sub-suelo que constituyen el centro histórico de la ciudad de cartagena y evaluación de su comportamiento sísmico, sector san diego*. Cartagena.
- UNC, U. N. (S.F). *DESARROLLO DE PROCESOS DE LICUACION*. Obtenido de https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjThKOes5TVAhWBOyYKHQInCxYQFggwMAI&url=http%3A%2F%2Ficc.ucv.cl%2Fgeotecnia%2F18_ciclo_conferencias%2F02segundajornada%2Fclases%2F02procesoslicuacion.ppt&usg=AFQjCN
- UNESCO. (1984). <http://portal.unesco.org>. Obtenido de http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=12573&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html
- Universidad de la Republica. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Obtenido de <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>

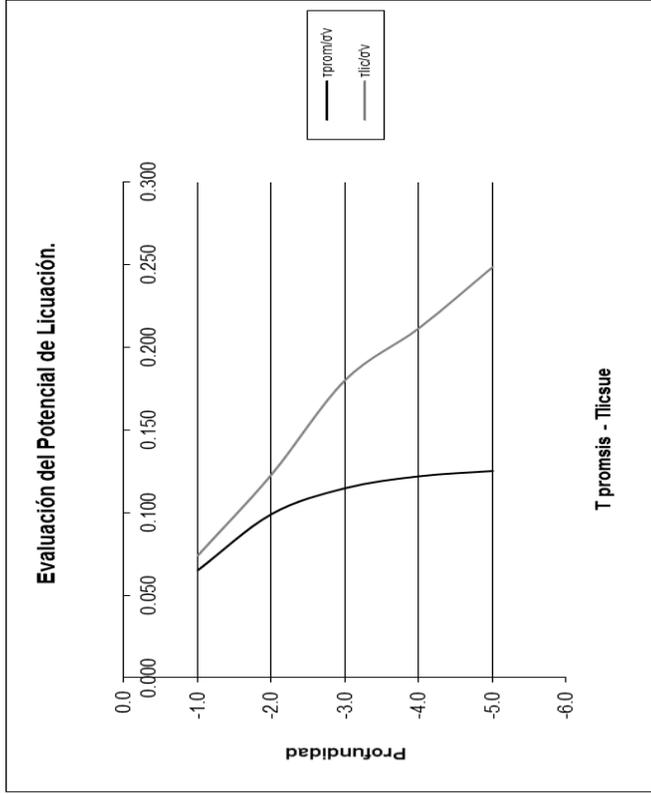
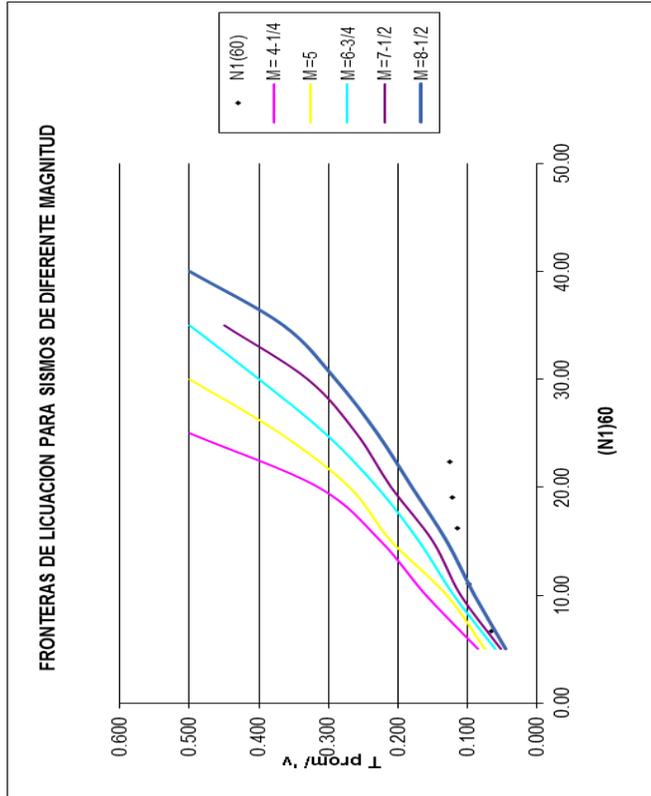
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. (s.f.). *DESARROLLO DE PROCESOS DE LICUACION*. Obtenido de https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjThKOes5TVAhWBOyYKHQInCxYQFggwMAI&url=http%3A%2F%2Ficc.ucv.cl%2Fgeotecnia%2F18_ciclo_conferencias%2F02segundajornada%2Fclases%2F02procesoslicuacion.ppt&usg=AFQjCN

Valenzuela, J. (2006). *Escalas de Intensidad y Magnitud Apuntes de Clases*.

10. ANEXOS

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S1 Nmedido																		
Prof.	N medido	F	IP	NP	Gt	u	σv	σ'v	rd	tprom/σ'v	Cn	CF	(N1)60	tlc/σ'v	CP	(tprom/σ'v)/CP	Condicion de licuación	Observaciones
m	golpes/pie	%	%	m	ton/m3	ton/m2	ton/m2	ton/m2										
1.0	1	10.0		1.0	1.40	0.0	1.400	1.4	1.00	0.065	2.204	5.000	6.65	0.074	0.9	0.073	0.001	No Licuable
2.0	4	10.0		1.0	1.49	1.0	2.890	1.9	1.00	0.099	2.020	5.000	11.06	0.123	0.9	0.111	0.012	No Licuable
3.0	8	11.0		1.0	1.67	2.0	4.560	2.6	0.99	0.115	1.834	5.207	16.21	0.180	0.9	0.129	0.051	No Licuable
4.0	11	11.0		1.0	1.75	3.0	6.310	3.3	0.98	0.122	1.677	5.207	19.04	0.211	0.9	0.137	0.075	No Licuable
5.0	15	10.0		1.0	1.80	4.0	8.110	4.1	0.97	0.125	1.544	5.000	22.38	0.248	0.9	0.140	0.108	No Licuable

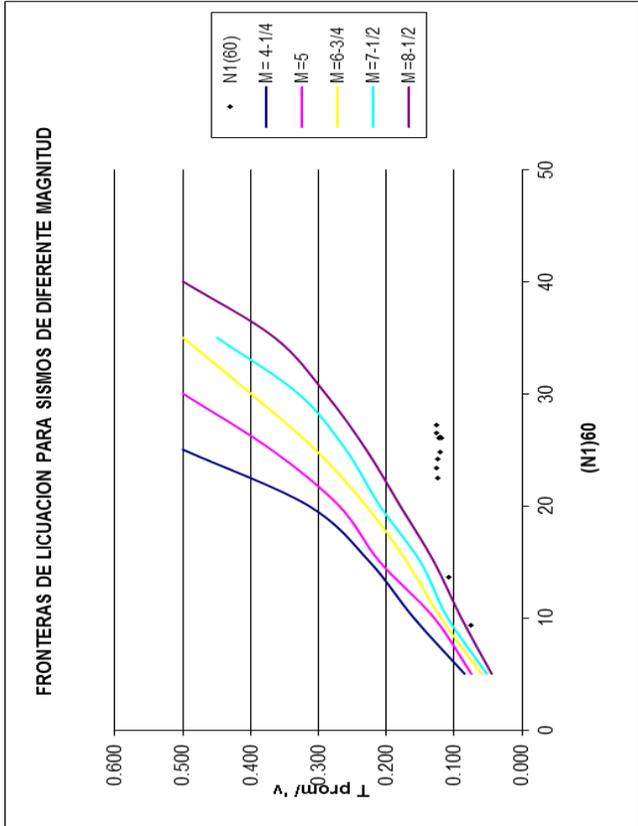
Tabla 32. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S1



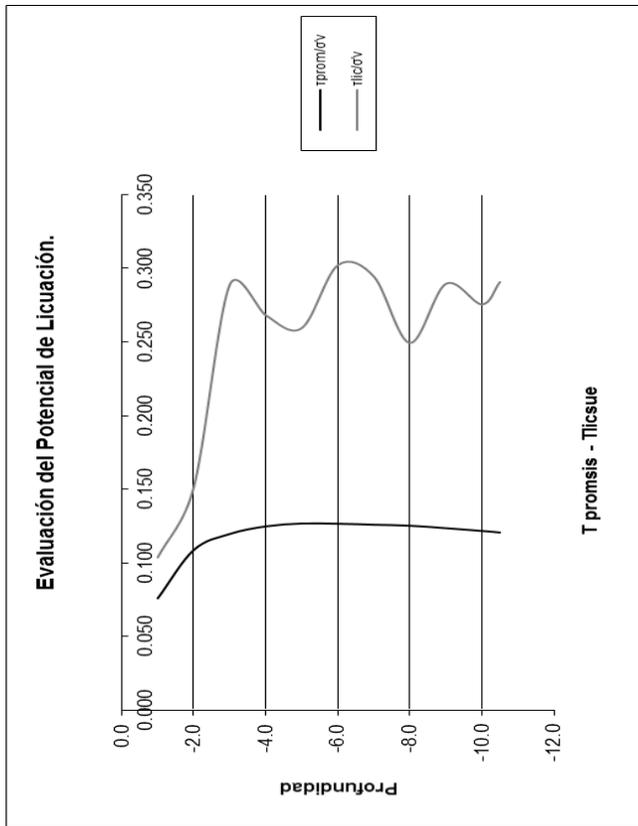
Gráfica 4. Fronteras de licuefacción Sondeo S1

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S2 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	τ_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	τ_{lic}/σ'_v	CP	$(\tau_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuación	Observaciones
1.0	2	15.0		0.8	1.41	0.2	1.410	1.2	1.00	0.076	2.293	5.880	9	0.103	0.9	0.085	0.018	No Licuable
2.0	5	15.0		0.8	1.56	1.2	2.970	1.8	1.00	0.109	2.060	5.880	14	0.151	0.9	0.122	0.029	No Licuable
3.0	15	12.0		0.8	1.80	2.2	4.770	2.6	0.99	0.119	1.832	5.396	26	0.289	0.9	0.134	0.155	No Licuable
4.0	15	12.0		0.8	1.80	3.2	6.570	3.4	0.98	0.125	1.666	5.396	24	0.268	0.9	0.140	0.128	No Licuable
5.0	16	10.0		0.8	1.84	4.2	8.410	4.2	0.97	0.127	1.530	5.000	23	0.259	0.9	0.142	0.117	No Licuable
6.0	21	10.0		0.8	1.91	5.2	10.320	5.1	0.96	0.126	1.410	5.000	27	0.302	0.9	0.142	0.160	No Licuable
7.0	21	15.0		0.8	1.91	6.2	12.230	6.0	0.95	0.125	1.310	5.880	27	0.294	0.9	0.141	0.153	No Licuable
8.0	18	15.0		0.8	1.87	7.2	14.100	6.9	0.94	0.126	1.227	5.880	22	0.249	0.9	0.140	0.109	No Licuable
9.0	24	12.0		0.8	1.95	8.2	16.050	7.9	0.93	0.123	1.148	5.396	26	0.289	0.9	0.139	0.151	No Licuable
10.0	24	12.0		0.8	1.95	9.2	18.000	8.8	0.91	0.121	1.078	5.396	25	0.275	0.9	0.136	0.139	No Licuable
10.5	27	10.0		0.8	1.97	9.7	18.985	9.3	0.91	0.120	1.045	5.000	26	0.290	0.9	0.135	0.155	No Licuable

Tabla 33. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S2

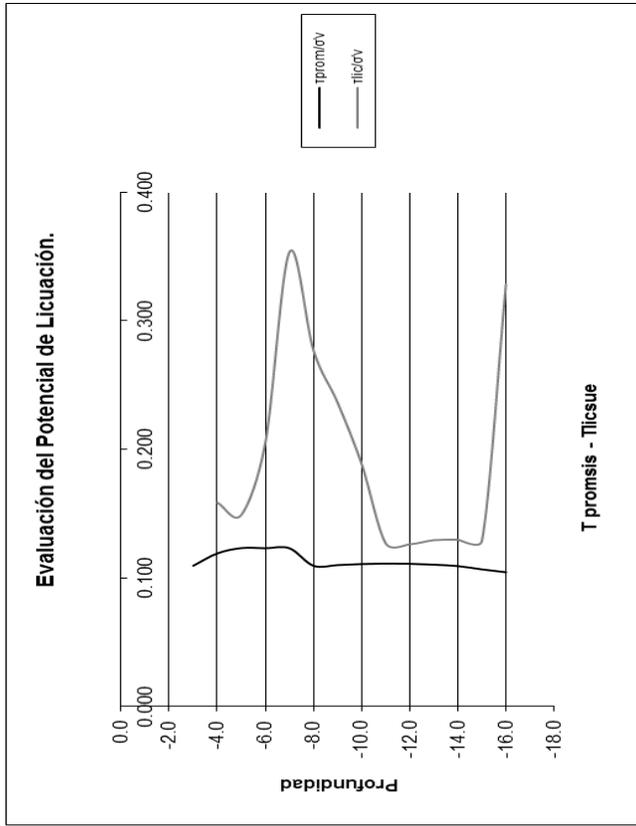
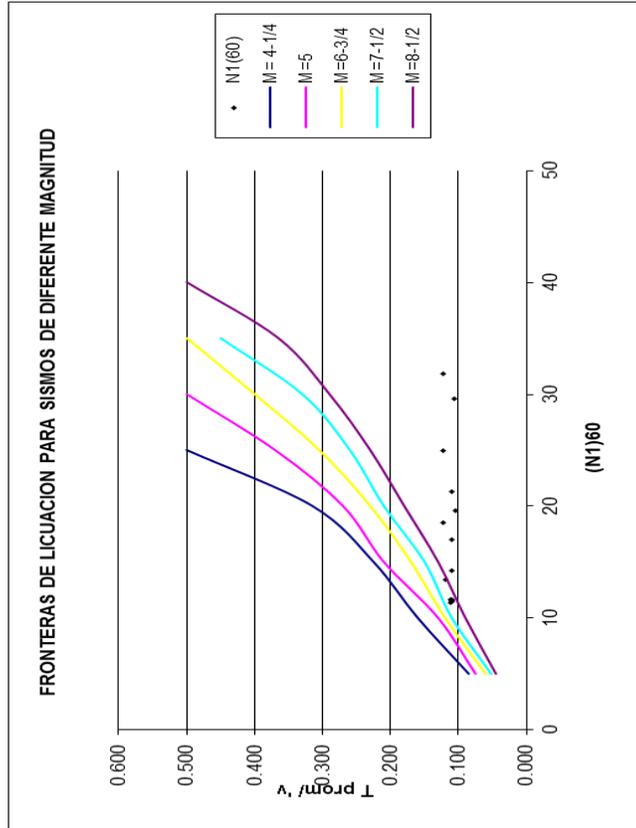


Gráfica 5. Fronteras de licuefacción Sondeo S2



EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																			
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S3 Nmedido																			
Prof. m	N medido golpes/plie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	t_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(t_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones	
1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3.0	7	10.0	-	1.0	1.62	2.0	4.860	2.9	0.99	0.109	1.767	5.000	14	0.158	0.9	0.123	0.036	No Licuable	
4.0	7	9.0	-	1.0	1.62	3.0	6.480	3.5	0.98	0.119	1.646	4.771	13	0.149	0.9	0.134	0.015	No Licuable	
5.0	12	9.0	-	1.0	1.76	4.0	8.240	4.2	0.97	0.123	1.525	4.771	18	0.205	0.9	0.138	0.067	No Licuable	
6.0	25	13.0	-	1.0	1.96	5.0	10.200	5.2	0.96	0.123	1.400	5.570	32	0.353	0.9	0.138	0.215	No Licuable	
7.0	20	12.0	-	1.0	1.90	6.0	12.100	6.1	0.95	0.123	1.303	5.396	25	0.277	0.9	0.138	0.139	No Licuable	
8.0	20	11.0	-	1.0	1.90	7.0	15.900	8.9	0.94	0.109	1.071	5.207	21	0.236	0.9	0.123	0.113	No Licuable	
9.0	16	9.0	-	1.0	1.84	8.0	17.740	9.7	0.93	0.111	1.016	4.771	17	0.188	0.9	0.123	0.065	No Licuable	
10.0	8	13.0	-	1.0	1.67	9.0	19.410	10.4	0.91	0.111	0.975	5.570	11	0.127	0.9	0.124	0.002	No Licuable	
11.0	8	14.0	-	1.0	1.67	10.0	21.080	11.1	0.90	0.111	0.937	5.731	11	0.126	0.9	0.125	0.001	No Licuable	
12.0	9	13.0	-	1.0	1.70	11.0	22.780	11.8	0.88	0.111	0.900	5.570	12	0.129	0.9	0.125	0.005	No Licuable	
13.0	10	11.0	-	1.0	1.72	12.0	24.500	12.5	0.86	0.110	0.863	5.207	12	0.130	0.9	0.124	0.006	No Licuable	
14.0	11	9.0	-	1.0	1.75	13.0	26.250	13.3	0.85	0.109	0.828	4.771	12	0.129	0.9	0.123	0.006	No Licuable	
15.0	42	10.0	-	1.0	2.08	14.0	28.330	14.3	0.83	0.107	0.780	5.000	30	0.328	0.9	0.120	0.208	No Licuable	
16.0	26	11.0	-	1.0	1.96	15.0	30.290	15.3	0.81	0.104	0.740	5.207	20	0.218	0.9	0.117	0.101	No Licuable	

Tabla 34 Evaluación del potencial de licuación Sondeo S3



Gráfica 6. Fronteras de licuefacción Sondeo S3

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S4 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	t_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(t_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	4	12.0		1.0	1.49	0.0	1.490	1.5	1.00	0.065	2.166	5.396	12	0.132	0.9	0.073	0.059	No Licuable
2.0	4	11.0		1.0	1.49	1.0	2.980	2.0	1.00	0.097	1.992	5.207	11	0.124	0.9	0.109	0.015	No Licuable
3.0	7	10.0		1.0	1.62	2.0	4.600	2.6	0.99	0.114	1.825	5.000	15	0.162	0.9	0.128	0.034	No Licuable
4.0	7	10.0		1.0	1.62	3.0	6.220	3.2	0.98	0.123	1.694	5.000	14	0.154	0.9	0.139	0.016	No Licuable
5.0	10	9.0		1.0	1.72	4.0	7.940	3.9	0.97	0.128	1.570	4.771	17	0.184	0.9	0.143	0.040	No Licuable
6.0	16	9.0		1.0	1.84	5.0	9.780	4.8	0.96	0.128	1.452	4.771	22	0.246	0.9	0.144	0.102	No Licuable
7.0	16	8.0		1.0	1.84	6.0	11.620	5.6	0.95	0.128	1.353	4.515	21	0.230	0.9	0.144	0.086	No Licuable
7.5	20	9.0		1.0	1.90	6.5	12.570	6.1	0.95	0.128	1.306	4.771	24	0.270	0.9	0.143	0.127	No Licuable

Tabla 35. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S4

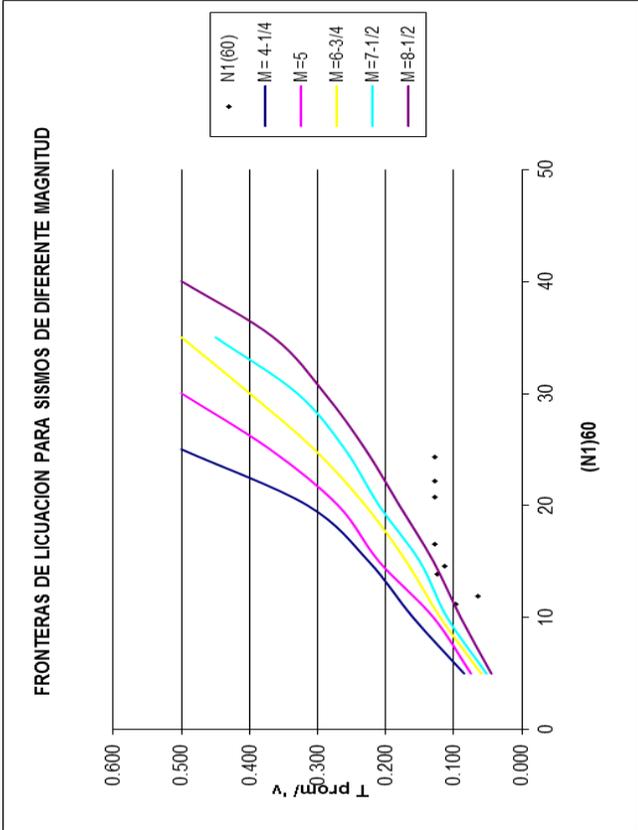
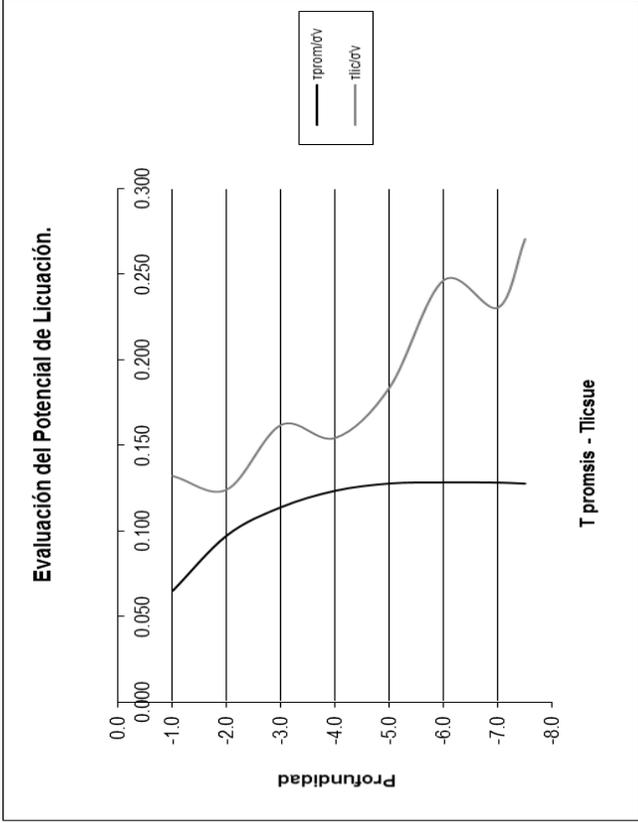
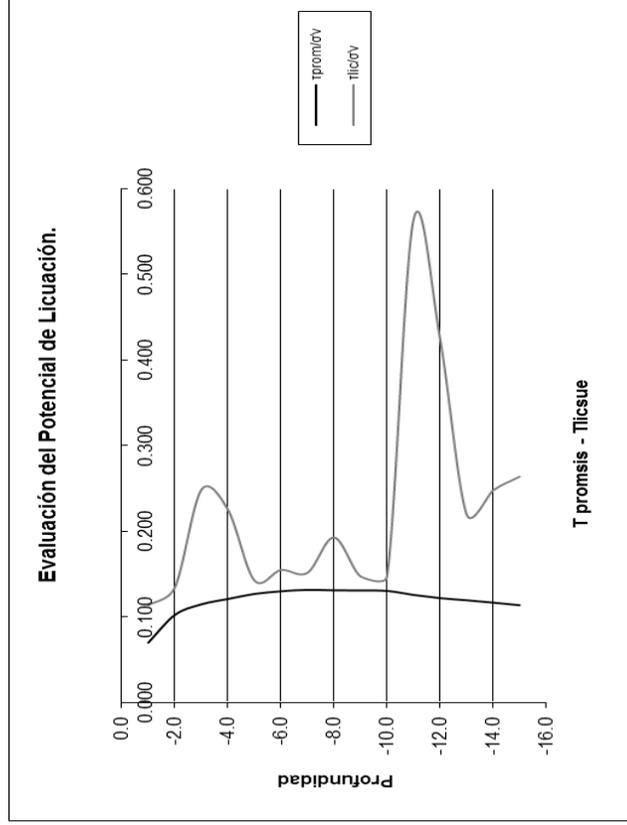
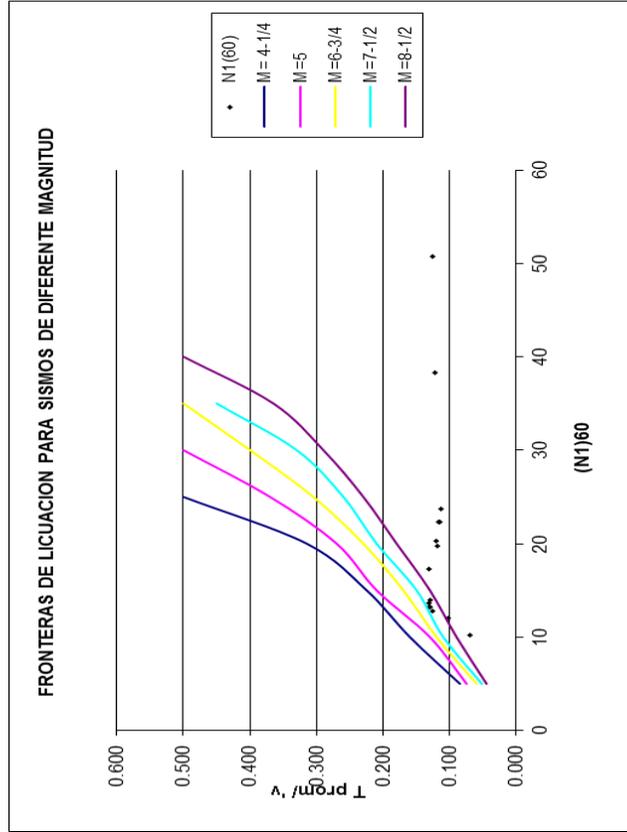


Gráfico 7. Fronteras de licuefacción Sondeo S4



EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S5 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	ov ton/m2	$\sigma'v$ ton/m2	rd	$\tau_{prom}/\sigma'v$	Cn	CF	(N1)60	$\tau_{lic}/\sigma'v$	CP	$(\tau_{prom}/\sigma'v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	3	11.0		0.9	1.44	0.1	1.440	1.3	1.00	0.070	2.231	5.207	10	0.114	0.9	0.078	0.035	No Licuable
2.0	5	8.0		0.9	1.56	1.1	3.000	1.9	1.00	0.102	2.017	4.515	12	0.134	0.9	0.115	0.019	No Licuable
3.0	13	9.0		0.9	1.79	2.1	4.790	2.7	0.99	0.115	1.804	4.771	22	0.248	0.9	0.129	0.119	No Licuable
4.0	13	7.0		0.9	1.79	3.1	6.580	3.5	0.98	0.121	1.646	4.225	20	0.225	0.9	0.136	0.089	No Licuable
5.0	6	15.0		0.9	1.62	4.1	8.200	4.1	0.97	0.127	1.546	5.880	13	0.142	0.9	0.142	0.000	No Licuable
6.0	8	11.0		0.9	1.67	5.1	9.870	4.8	0.96	0.130	1.453	5.207	14	0.155	0.9	0.146	0.009	No Licuable
7.0	8	12.0		0.9	1.67	6.1	11.540	5.4	0.95	0.131	1.373	5.396	14	0.151	0.9	0.148	0.004	No Licuable
8.0	13	9.0		0.9	1.79	7.1	13.330	6.2	0.94	0.131	1.290	4.771	17	0.193	0.9	0.147	0.045	No Licuable
9.0	9	10.0		0.9	1.70	8.1	15.030	6.9	0.93	0.131	1.225	5.000	13	0.147	0.9	0.147	0.000	No Licuable
10.0	9	12.0		0.9	1.70	9.1	16.730	7.6	0.91	0.130	1.166	5.396	13	0.147	0.9	0.146	0.001	No Licuable
11.0	56	12.0		0.9	2.15	10.1	18.880	8.8	0.90	0.126	1.080	5.396	51	0.563	0.9	0.141	0.422	No Licuable
12.0	44	10.0		0.9	2.09	11.1	20.970	9.9	0.88	0.122	1.008	5.000	38	0.425	0.9	0.137	0.288	No Licuable
13.0	21	9.0		0.9	1.91	12.1	22.880	10.8	0.86	0.119	0.954	4.771	20	0.220	0.9	0.134	0.086	No Licuable
14.0	25	12.0		0.9	1.96	13.1	24.840	11.7	0.85	0.117	0.902	5.396	22	0.248	0.9	0.131	0.117	No Licuable
15.0	29	11.0		0.9	1.99	14.1	26.830	12.7	0.83	0.114	0.852	5.207	24	0.264	0.9	0.128	0.136	No Licuable

Tabla 36. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S5



Gráfica 8. Fronteras de licuefacción Sondeo S5

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S6 Nmedido																		
Prof.	N medido	F	IP	NP	Gt	u	σ_v	σ'_v	rd	tprom/ σ'_v	Cn	CF	(N1)60	tlc/ σ'_v	CP	(tprom/ σ'_v)/CP	Condicion de licuación	Observaciones
m	golpes/pie	%	%	m	ton/m3	ton/m2	ton/m2	ton/m2										
1.0	2	13.4	0.6	0.6	1.41	0.4	2.12	1.7	1.00	0.080	2.080	5.636	9	0.097	0.9	0.090	0.007	No Licuable
2.0	4	10.0	0.6	0.6	1.49	1.4	3.61	2.2	1.00	0.106	1.926	5.000	11	0.120	0.9	0.119	0.001	No Licuable
3.0	4	11.0	0.6	0.6	1.49	2.4	5.10	2.7	0.99	0.122	1.803	5.207	11	0.118	0.9	0.137	-0.019	Licuable
4.0	4	9.0	0.6	0.6	1.49	3.4	6.59	3.2	0.98	0.132	1.701	4.771	10	0.110	0.9	0.148	-0.039	Licuable
5.0	11	10.0	0.6	0.6	1.75	4.4	8.34	3.9	0.97	0.134	1.571	5.000	18	0.199	0.9	0.151	0.049	No Licuable
6.0	5	10.0	0.6	0.6	1.56	5.4	9.90	4.5	0.96	0.138	1.490	5.000	11	0.118	0.9	0.155	-0.038	Licuable
7.0	5	11.0	0.6	0.6	1.56	6.4	11.46	5.1	0.95	0.140	1.418	5.207	11	0.117	0.9	0.158	-0.041	Licuable
8.0	4	10.0	0.6	0.6	1.49	7.4	12.95	5.5	0.94	0.143	1.361	5.000	9	0.101	0.9	0.160	-0.060	Licuable
9.0	2	11.0	0.6	0.6	1.41	8.4	14.36	6.0	0.93	0.145	1.317	5.207	7	0.080	0.9	0.163	-0.084	Licuable
10.0	2	8.0	0.6	0.6	1.41	9.4	15.77	6.4	0.91	0.147	1.277	4.515	6	0.071	0.9	0.165	-0.094	Licuable
10.5	21	11.0	0.6	0.6	1.91	9.9	16.72	6.8	0.91	0.144	1.234	5.207	25	0.274	0.9	0.162	0.111	No Licuable

Tabla 37. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S6

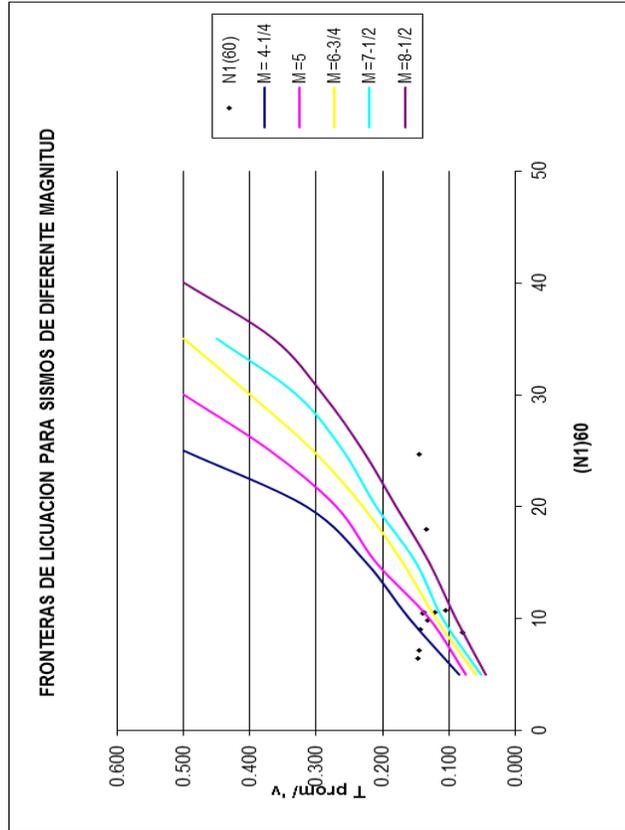
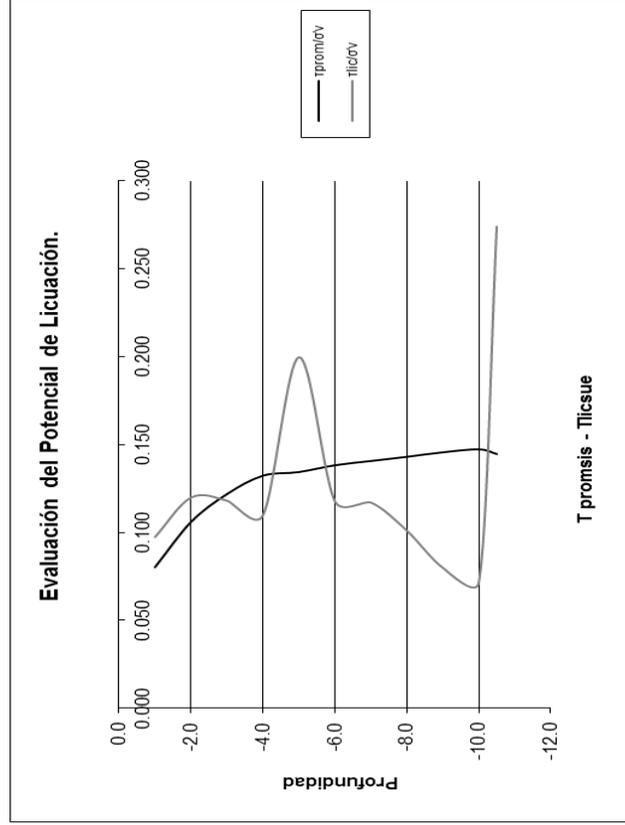
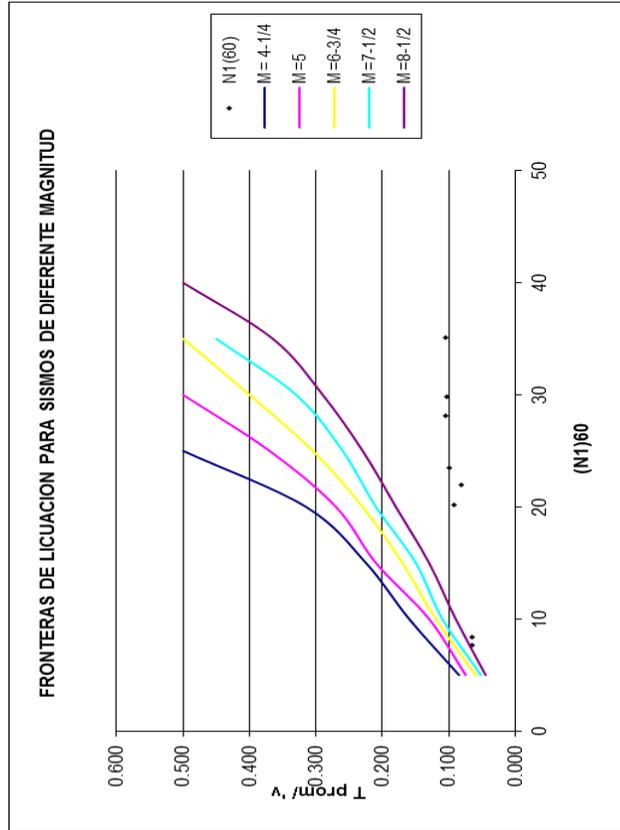


Gráfico 9. Fronteras de licuefacción Sondeo S6

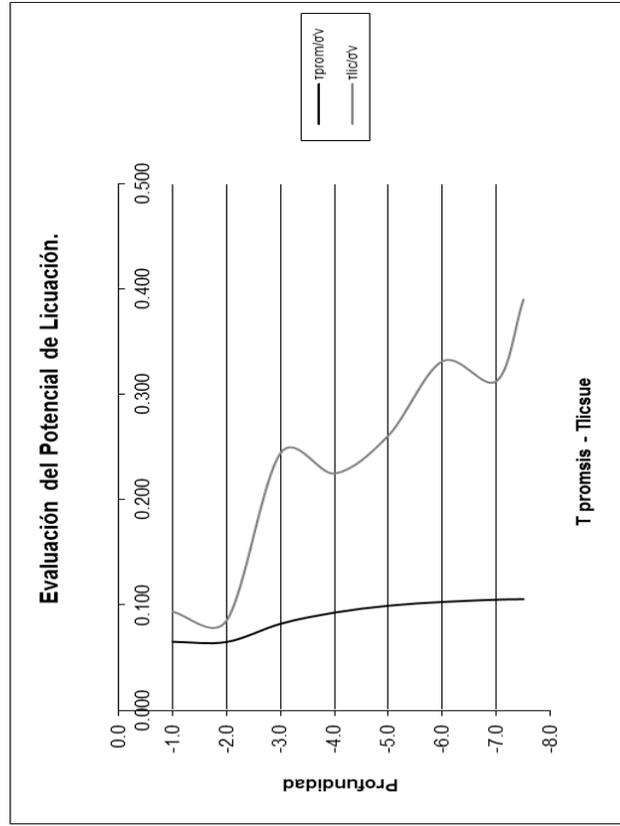


EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S7 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σv ton/m2	σ'v ton/m2	rd	τprom/σ'v	Cn	CF	(N1)60	τlic/σ'v	CP (τprom/σ'v)/CP	Condicion de licuacion	Observaciones	
																		ton/m2
1.0	3	5.0		2.0	1.44	0.0	1.44	1.4	1.00	0.065	2.187	3.495	8	0.093	0.9	0.073	0.020	No Licuable
2.0	2	10.0		2.0	1.41	0.0	2.85	2.9	1.00	0.065	1.769	5.000	8	0.085	0.9	0.073	0.012	No Licuable
3.0	14	10.0		2.0	1.80	1.0	4.65	3.7	0.99	0.082	1.617	5.000	22	0.244	0.9	0.092	0.152	No Licuable
4.0	14	8.0		2.0	1.80	2.0	6.45	4.5	0.98	0.093	1.496	4.515	20	0.224	0.9	0.104	0.120	No Licuable
5.0	18	9.0		2.0	1.87	3.0	8.32	5.3	0.97	0.099	1.386	4.771	23	0.261	0.9	0.111	0.149	No Licuable
6.0	26	9.0		2.0	1.96	4.0	10.28	6.3	0.96	0.103	1.285	4.771	30	0.331	0.9	0.115	0.216	No Licuable
7.0	26	9.0		2.0	1.96	5.0	12.24	7.2	0.95	0.105	1.198	4.771	28	0.312	0.9	0.118	0.194	No Licuable
7.5	35	9.0		2.0	2.04	5.5	13.26	7.8	0.95	0.105	1.155	4.771	35	0.390	0.9	0.118	0.271	No Licuable

Tabla 38. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S7

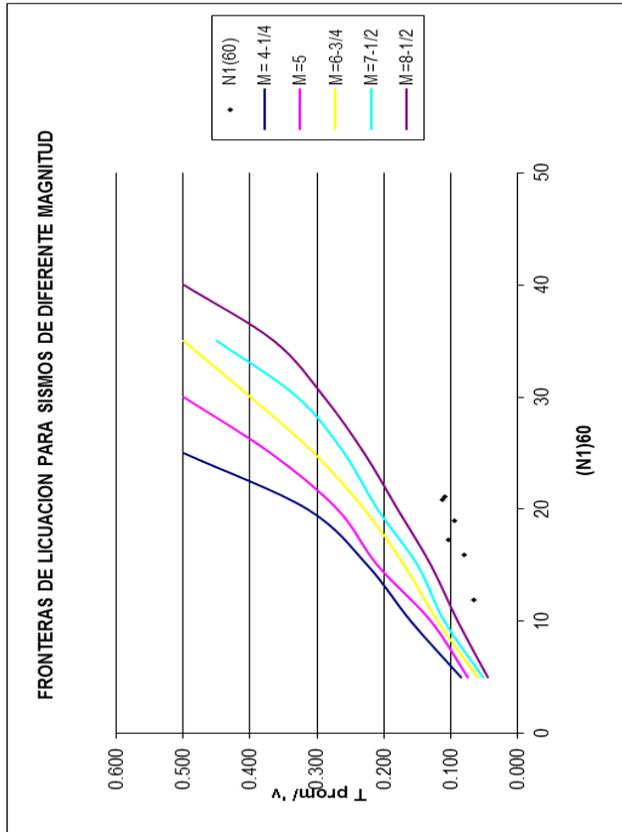


Gráfica 10. Fronteras de licuefacción Sondeo S7

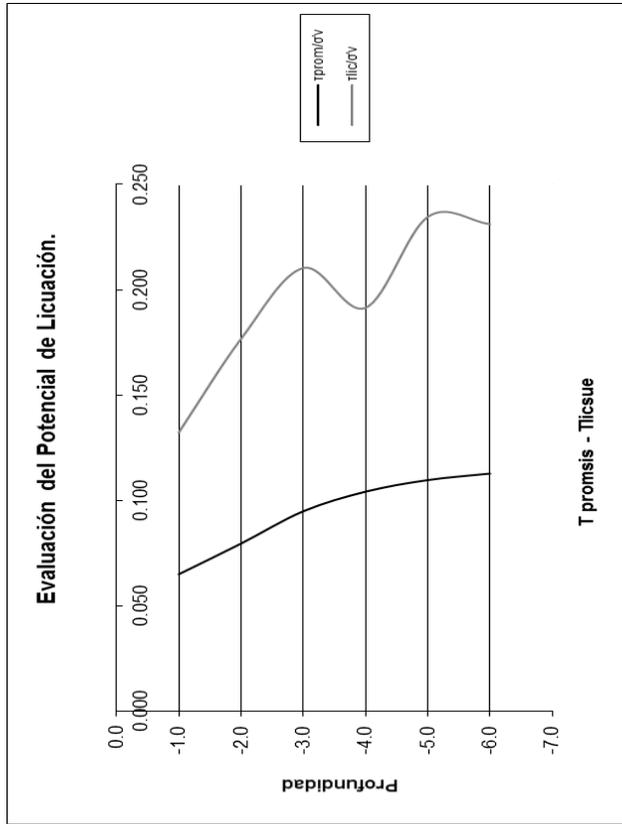


EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S8 Nmedido																		
Prof.	N medido	F	IP	NP	Gt	u	σ_v	σ'_v	rd	τ_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	τ_{lic}/σ'_v	CP	$(\tau_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuación	Observaciones
m	golpes/pie	%	%	m	ton/m3	ton/m2	ton/m2	ton/m2										
1.0	5	6.0		1.4	1.56	0.0	1.56	1.6	1.00	0.065	2.138	3.891	12	0.132	0.9	0.073	0.059	No Licuable
2.0	8	10.0		1.4	1.67	0.6	3.23	2.6	1.00	0.079	1.818	5.000	16	0.177	0.9	0.089	0.087	No Licuable
3.0	11	11.0		1.4	1.75	1.6	4.98	3.4	0.99	0.095	1.664	5.207	19	0.210	0.9	0.106	0.104	No Licuable
4.0	11	8.0		1.4	1.75	2.6	6.73	4.1	0.98	0.104	1.542	4.515	17	0.191	0.9	0.117	0.074	No Licuable
5.0	15	10.0		1.4	1.80	3.6	8.53	4.9	0.97	0.110	1.433	5.000	21	0.234	0.9	0.123	0.111	No Licuable
6.0	16	9.0		1.4	1.84	4.6	10.37	5.8	0.96	0.113	1.337	4.771	21	0.231	0.9	0.127	0.104	No Licuable

Tabla 39. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S8

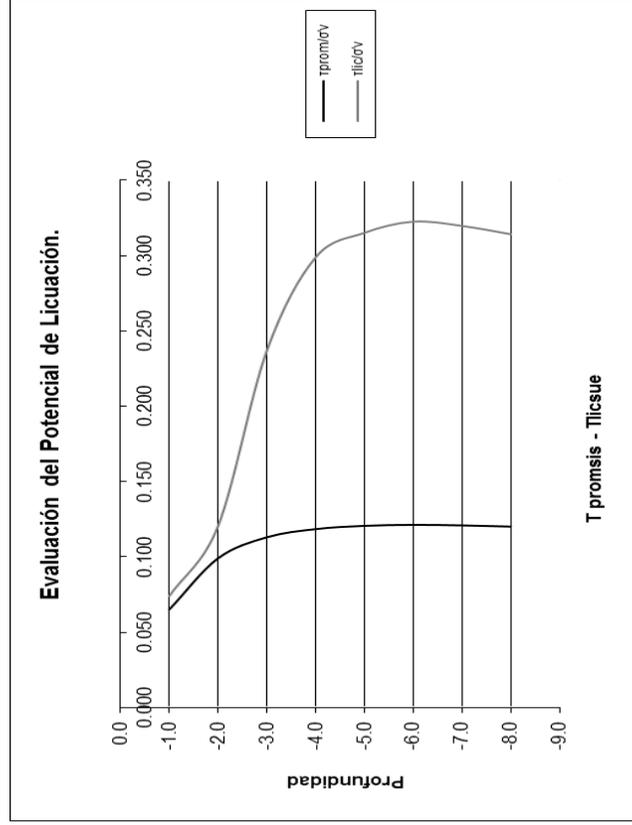
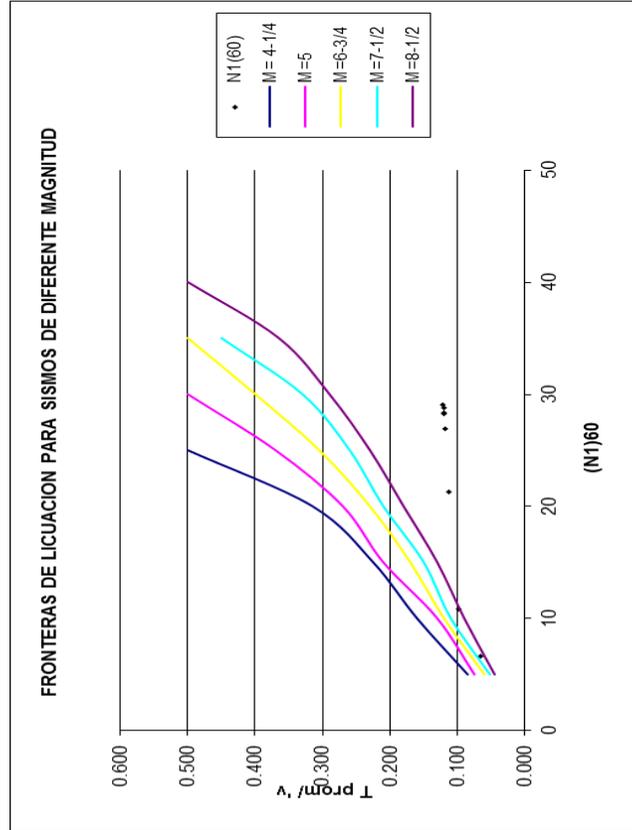


Gráfica 11. Fronteras de licuefacción Sondeo S8



EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S9 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	t_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(t_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	1	10.0	10.0	1.0	1.40	0.0	1.40	1.4	1.00	0.065	2.204	5.000	7	0.074	0.9	0.073	0.001	No Licuable
2.0	4	9.0	9.0	1.0	1.49	1.0	2.89	1.9	1.00	0.099	2.020	4.771	11	0.120	0.9	0.111	0.009	No Licuable
3.0	12	10.0	10.0	1.0	1.76	2.0	4.65	2.7	0.99	0.113	1.813	5.000	21	0.237	0.9	0.127	0.110	No Licuable
4.0	18	9.0	9.0	1.0	1.87	3.0	6.52	3.5	0.98	0.118	1.639	4.771	27	0.299	0.9	0.133	0.166	No Licuable
5.0	21	9.0	9.0	1.0	1.91	4.0	8.43	4.4	0.97	0.121	1.499	4.771	28	0.315	0.9	0.135	0.180	No Licuable
6.0	23	11.0	11.0	1.0	1.93	5.0	10.36	5.4	0.96	0.121	1.382	5.207	29	0.322	0.9	0.136	0.186	No Licuable
7.0	25	9.0	9.0	1.0	1.96	6.0	12.32	6.3	0.95	0.121	1.281	4.771	29	0.320	0.9	0.136	0.184	No Licuable
8.0	26	10.0	10.0	1.0	1.96	7.0	14.28	7.3	0.94	0.120	1.194	5.000	28	0.314	0.9	0.135	0.179	No Licuable

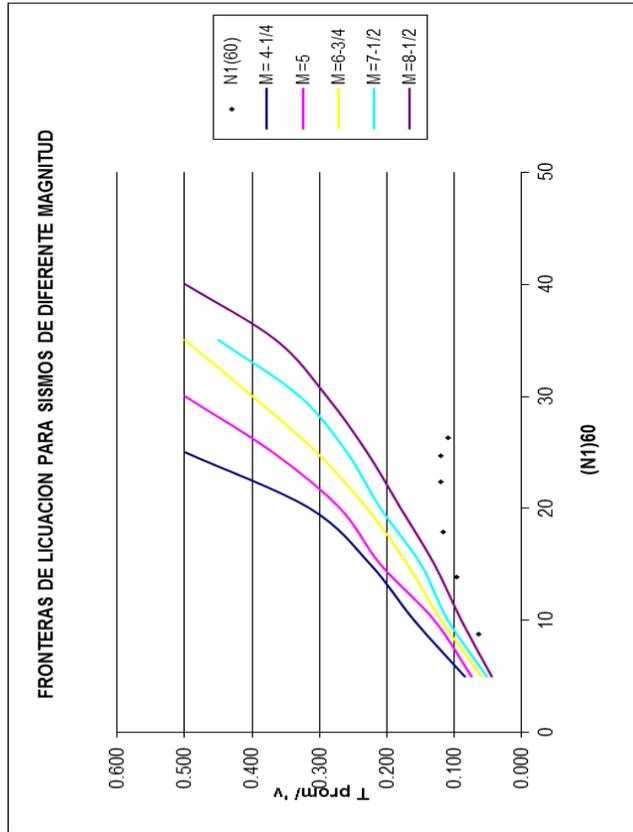
Tabla 40. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S9



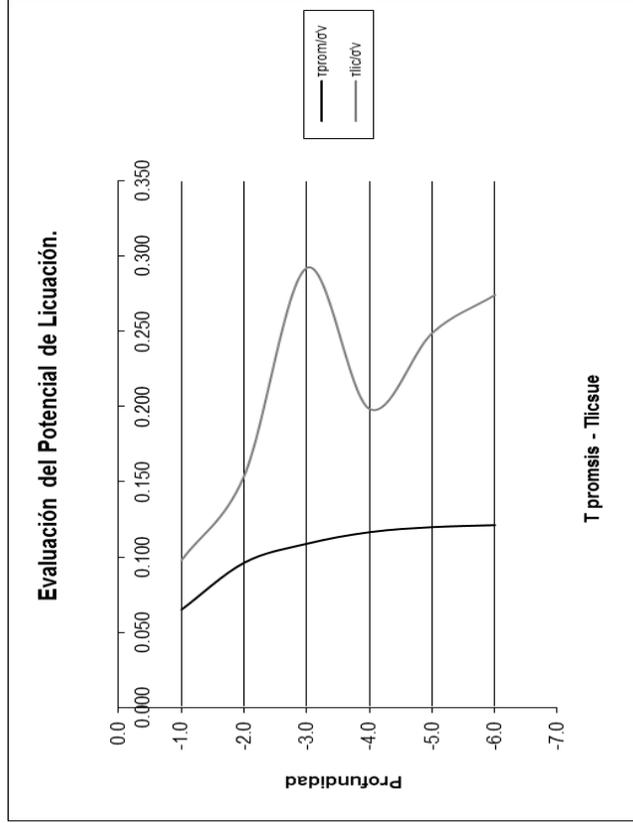
Gráfica 12. Fronteras de licuefacción Sondeo S9

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S10 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σv ton/m2	σ'v ton/m2	rd	tprom/σ'v	Cn	CF	(N1)60	tlc/σ'v	CP	(tprom/σ'v)/CP	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	3	6.0		1.0	1.44	0.0	1.44	1.4	1.00	0.065	2.187	3.891	9	0.098	0.9	0.073	0.025	No Licuable
2.0	6	10.0		1.0	1.62	1.0	3.06	2.1	1.00	0.096	1.967	5.000	14	0.154	0.9	0.108	0.046	No Licuable
3.0	16	11.0		1.0	1.84	2.0	4.90	2.9	0.99	0.109	1.758	5.207	26	0.292	0.9	0.122	0.170	No Licuable
4.0	11	8.0		1.0	1.75	3.0	6.65	3.7	0.98	0.116	1.617	4.515	18	0.198	0.9	0.131	0.067	No Licuable
5.0	16	8.0		1.0	1.84	4.0	8.49	4.5	0.97	0.120	1.490	4.515	22	0.249	0.9	0.135	0.114	No Licuable
6.0	19	10.0		1.0	1.88	5.0	10.37	5.4	0.96	0.121	1.381	5.000	25	0.274	0.9	0.136	0.138	No Licuable

Tabla 41. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S10

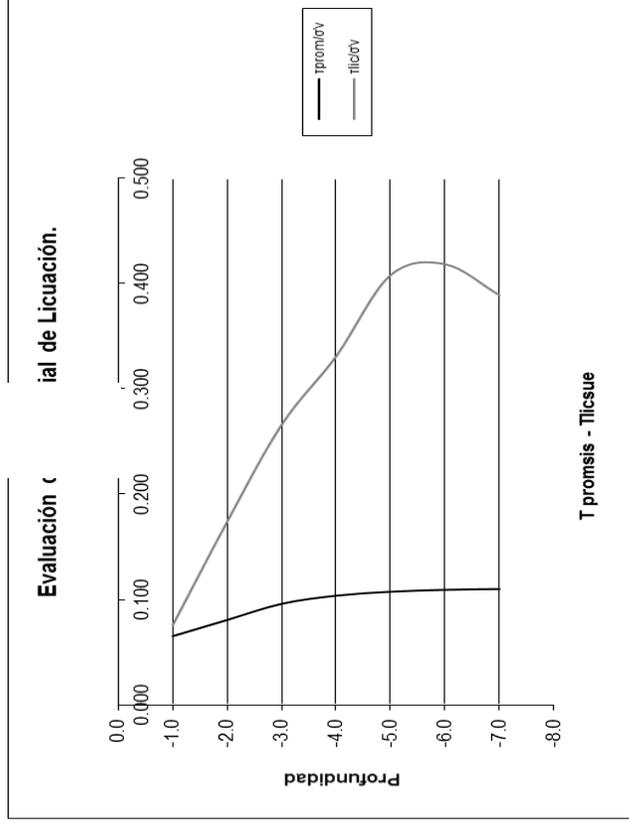
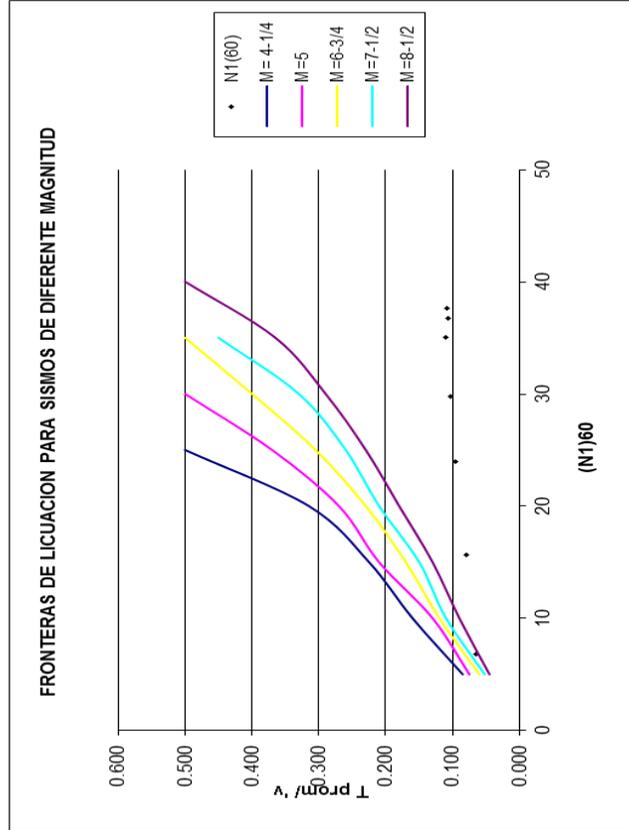


Gráfica 13. Fronteras de licuefacción Sondeo S10



EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S11 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	t_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(t_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	2	5.0		1.4	1.41	0.0	1.41	1.4	1.00	0.065	2.200	3.495	7	0.075	0.9	0.073	0.002	No Licuable
2.0	8	8.0		1.4	1.67	0.6	3.08	2.5	1.00	0.080	1.854	4.515	16	0.174	0.9	0.090	0.083	No Licuable
3.0	15	10.0		1.4	1.80	1.6	4.88	3.3	0.99	0.096	1.683	5.000	24	0.266	0.9	0.108	0.158	No Licuable
4.0	22	8.0		1.4	1.92	2.6	6.80	4.2	0.98	0.103	1.531	4.515	30	0.331	0.9	0.116	0.214	No Licuable
5.0	30	11.0		1.4	2.00	3.6	8.80	5.2	0.97	0.107	1.400	5.207	37	0.408	0.9	0.120	0.287	No Licuable
6.0	34	9.0		1.4	2.03	4.6	10.83	6.2	0.96	0.109	1.290	4.771	38	0.418	0.9	0.122	0.296	No Licuable
7.0	34	8.0		1.4	2.03	5.6	12.86	7.3	0.95	0.110	1.196	4.515	35	0.389	0.9	0.123	0.265	No Licuable

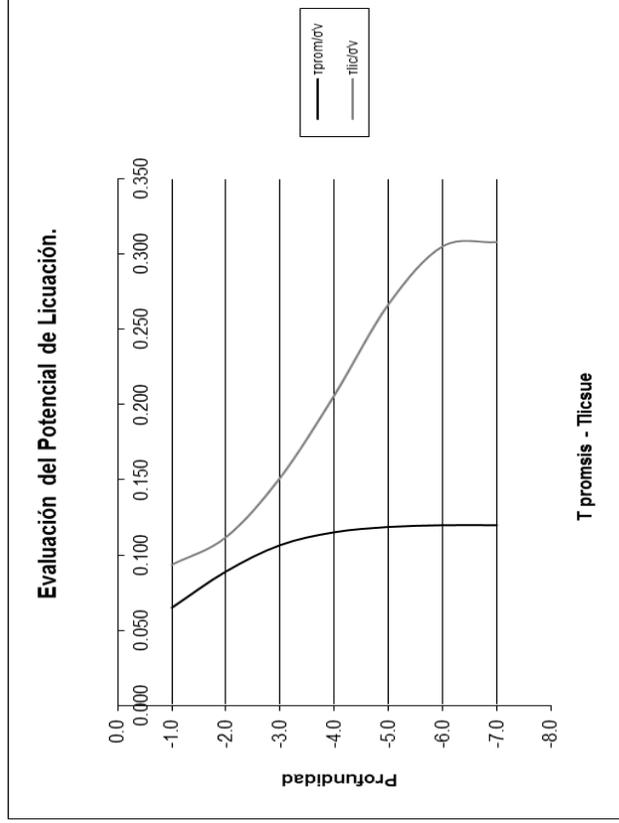
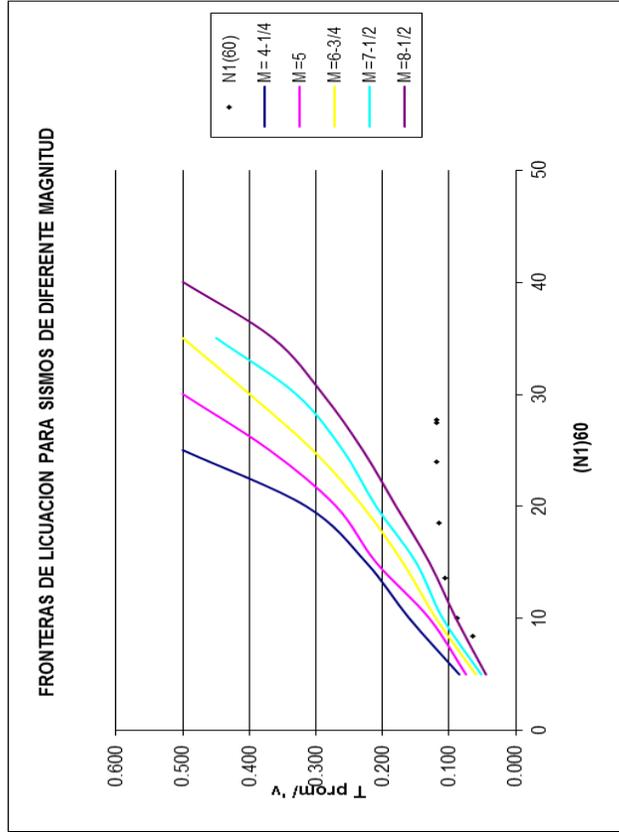
Tabla 42. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S11



Gráfica 14. Fronteras de licuefacción Sondeo S11

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S12 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	σ_v ton/m2	σ'_v ton/m2	rd	t_{prom}/σ'_v	Cn	CF	(N1)60	t_{lic}/σ'_v	CP	$(t_{prom}/\sigma'_v)/CP$	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	3	5.0	7.0	1.2	1.44	0.0	1.44	1.4	1.00	0.065	2.187	3.495	8	0.093	0.9	0.073	0.020	No Licuable
2.0	4	7.0	7.0	1.2	1.49	0.8	2.93	2.1	1.00	0.089	1.947	4.225	10	0.112	0.9	0.100	0.012	No Licuable
3.0	7	7.0	7.0	1.2	1.62	1.8	4.55	2.8	0.99	0.106	1.791	4.225	14	0.151	0.9	0.120	0.032	No Licuable
4.0	11	10.0	7.0	1.2	1.75	2.8	6.30	3.5	0.98	0.115	1.643	5.000	19	0.206	0.9	0.129	0.077	No Licuable
5.0	17	9.0	7.0	1.2	1.86	3.8	8.16	4.4	0.97	0.119	1.508	4.771	24	0.266	0.9	0.133	0.133	No Licuable
6.0	22	8.0	7.0	1.2	1.92	4.8	10.08	5.3	0.96	0.120	1.391	4.515	27	0.305	0.9	0.134	0.170	No Licuable
7.0	24	8.0	7.0	1.2	1.95	5.8	12.03	6.2	0.95	0.120	1.290	4.515	28	0.308	0.9	0.134	0.173	No Licuable

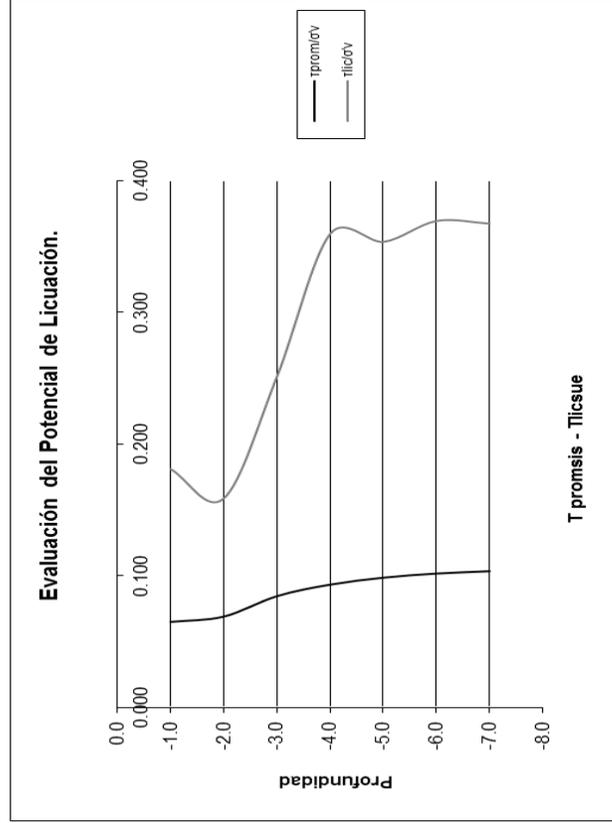
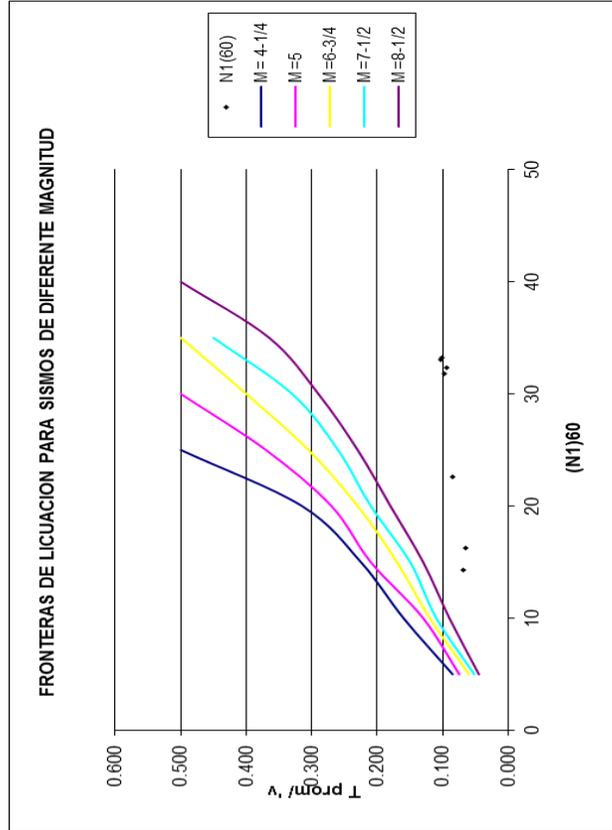
Tabla 43. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S12



Gráfica 15. Fronteras de licuación Sondeo S12

EVALUACION DEL POTENCIAL DE LICUACION																		
SECTOR SAN PEDRO SONDEO CRITICO S13 Nmedido																		
Prof. m	N medido golpes/pie	F %	IP %	NP m	Gt ton/m3	u ton/m2	ov ton/m2	σv ton/m2	rd	τprom/σv	Cn	CF	(N1)60	tlc/σv	CP	(τprom/σv)/CP	Condicion de licuacion	Observaciones
1.0	7	11.0	11.0	1.8	1.62	0.0	1.62	1.6	1.00	0.065	2.115	5.207	16	0.181	0.9	0.073	0.108	No Licuable
2.0	7	11.0	11.0	1.8	1.62	0.2	3.24	3.0	1.00	0.069	1.729	5.207	14	0.159	0.9	0.077	0.081	No Licuable
3.0	15	9.0	9.0	1.8	1.80	1.2	5.04	3.8	0.99	0.084	1.586	4.771	23	0.251	0.9	0.095	0.156	No Licuable
4.0	25	11.0	11.0	1.8	1.96	2.2	7.00	4.8	0.98	0.093	1.449	5.207	32	0.359	0.9	0.105	0.255	No Licuable
5.0	27	9.0	9.0	1.8	1.97	3.2	8.97	5.8	0.97	0.098	1.337	4.771	32	0.353	0.9	0.111	0.243	No Licuable
6.0	30	12.0	12.0	1.8	2.00	4.2	10.97	6.8	0.96	0.102	1.239	5.396	33	0.369	0.9	0.114	0.255	No Licuable
7.0	32	12.0	12.0	1.8	2.01	5.2	12.98	7.8	0.95	0.103	1.154	5.396	33	0.367	0.9	0.116	0.251	No Licuable

Tabla 44. Evaluación del potencial de licuación Sondeo S13



Gráfica 16. Fronteras de licuefacción Sondeo S13