

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**ELABORACIÓN DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS  
GEOTÉCNICAS PARA EL MUNICIPIO DE SAN  
SALVADOR Y PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS  
MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS  
PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN,  
EDIFICACIONES DE TRES Y MÁS NIVELES**

PRESENTADO POR:

**KARLA JANETH ESCALANTE CERRITOS**

**KARLA NOEMI LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**HÉCTOR ALEJANDRO ZEPEDA CASTRO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2018

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS**

SECRETARIA GENERAL :

**MSC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO CIVIL**

Título :

**ELABORACIÓN DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS  
GEOTÉCNICAS PARA EL MUNICIPIO DE SAN  
SALVADOR Y PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS  
MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS  
PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN,  
EDIFICACIONES DE TRES Y MÁS NIVELES**

Presentado por :

**KARLA JANETH ESCALANTE CERRITOS**

**KARLA NOEMI LÓPEZ HERNÁNDEZ**

**HÉCTOR ALEJANDRO ZEPEDA CASTRO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA**

**ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA**

**ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ**

**ING. MAURICIO ERNESTO VÁSQUEZ CERROS**

San Salvador, mayo 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores :

**ING. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJÍA**

**ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA**

**ING. JOSÉ ALEXANDER CHÁVEZ HERNÁNDEZ**

**ING. MAURICIO ERNESTO VÁSQUEZ CERROS**



## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente a **DIOS**, por permitirnos concluir satisfactoriamente esta investigación y por iluminarnos con sabiduría, inteligencia y perseverancia a lo largo de toda nuestra carrera.

Agradecemos a nuestra asesora directora: **Ing. Lesly Emidalia Mendoza**, por guiarnos con sus conocimientos en las materias que nos impartió, así como también el apoyo brindado desde el inicio hasta el final de este trabajo de graduación, gracias por su tiempo y dedicación.

Agradecemos a nuestros asesores **Ing. José Miguel Landaverde Quijada, Ing. José Alexander Chávez Hernández y al Ing. Mauricio Ernesto Vásquez**, por compartir sus conocimientos que fueron un apoyo fundamental en el desarrollo de la presente investigación.

Agradecemos a la **Universidad de El Salvador**, por habernos formado como profesionales con carácter, para poder enfrentar retos y desenvolvernos exitosamente en el mundo laboral.

Asimismo, agradecemos a la **Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador(OPAMSS)** por facilitarnos el tema de investigación y por su disposición para brindarnos las mejores condiciones en del desarrollo de la primera etapa del trabajo de graduación.

**¡MUCHAS GRACIAS!**

## DEDICATORIA

Primeramente, le doy gracias a Dios por iluminarme en mi camino a lo largo de mi vida y por permitirme llegar a este momento.

Le agradezco a mi madre **Yaneth Cerritos** y a mi padre **Carlos Escalante** por su apoyo incondicional, su confianza, amor, comprensión, tiempo y respeto hacia mi persona, por enseñarme a nunca darme por vencida y por ponerme metas claras en mi vida. Por demostrarme que nunca es tarde para seguir aprendiendo. Gracias por sus consejos que hasta la fecha son mi guía y me han ayudado a ser una mejor persona cada día, ambos son mi ejemplo a seguir. Les agradezco por motivarme cada día a buscar mi felicidad. Gracias por todo su esfuerzo y sacrificio.

A mi abuelita **Blanca Cerritos**, por estar pendiente de mí cada vez que tenía una evaluación, desde el primer día de la universidad hasta el día de mi última defensa. Gracias por pedirle a Dios que guardara de mí en situaciones difíciles, por llevarme en sus oraciones y en su corazón siempre.

A toda mi familia por creer en mí, en especial a mi sobrino **Kevin Castillo** por darme ánimos y alegría cuando más lo necesitaba, a **Jimmy Castillo**, a mis tías **Lilian, Deysi, Flor y Arely**. Gracias por cuidar siempre de mí.

A **Karla López**, como siempre lo eh dicho Dios la puso en mi camino para que juntas lográramos culminar la carrera, mi mejor amiga, hermana y confidente. Sé que nos esperan grandes cosas juntas. Gracias por tu apoyo incondicional.

A mi amigo y compañero de tesis **Alejandro Zepeda** por tenernos paciencia mutuamente y apoyarnos en momentos difíciles.

A **Aaron Berciano** por su apoyo, comprensión y cariño. Gracias por estar siempre pendiente de mí.

A mis amigas **Karla N., Gaby, Yosselyn** y **July** por todas nuestras aventuras en la U y por sus consejos en los momentos difíciles. Fue un gusto y un honor compartir mi vida universitaria con ustedes, las quiero.

A mis amigas de toda la vida **Ale, Hele** y **Marce** por nuestra larga y sincera amistad. Gracias por siempre estar en los momentos difíciles, así como en los buenos. A pesar de la distancia, cuando estamos juntas seguimos siendo las mismas.

Gracias totales, los/as quiero con todo mi corazón.

Karla Janeth Escalante Cerritos

## DEDICATORIA

El momento más deseado de todo universitario, su GRADUACIÓN, primeramente, agradecerle a Dios por permitirme cumplir con la meta, por brindarme salud, paciencia y perseverancia durante esta aventura.

Le agradezco a mi mami **Mima** y mi papi **Carlos** por siempre brindarme su apoyo incondicional y confiar en mí siempre, a pesar de las altas y bajas de la carrera, ¡los amo!

### Mis compañeros de tesis:

- A mi mejor amiga, hermana, confidente, compañera de estudio, de aventuras, alegrías y tristezas, desde el primer día de clases, **Karla Janeth**, que por cuestiones del destino tenemos tantas cosas en común hasta el nombre, gracias por todos los momentos inolvidables de risas y llantos que vivimos juntas, gracias por enseñarme a no dar detalles de mi vida☺, me divertí y aprendí mucho junto a usted durante toda la carrera, la quiero mucho.
- Mi amigo y compañero **Alejandro**, gracias por los momentos de risas y enojos compartidos, perdón si en ciertas ocasiones colapsamos, era la presión de la tesis, gracias por tenerme paciencia y brindarme su cariño y comprensión, lo quiero mucho.

A **Janeth Cerritos** y **Carlos Escalante**, porque siempre me hicieron sentir como en casa, parte de su familia, por su amabilidad incondicional y consejos brindados durante la carrera.

A mis amigas (Chicas de Acero): **Karla J., Gaby, July y Josselyn**, por todas las locuras compartidas, consejos y noches de Ladies night, quien dijo que no había ingenieras guapas e inteligentes!

A mi asesora de tesis y excelente docente, una de las mejores, **Ing. Lesly Mendoza**, quien dedico de su tiempo a guiarnos durante esta dura tarea. Gracias por compartir sus conocimientos conmigo.

A mis familiares que estuvieron pendiente de mi resolución de tesis, **Isamar**, por siempre darme ánimos y confiar en mí. A mi Lassy por siempre sacarme la sonrisa más sincera en los momentos de estrés.

***Karla Noemi López Hernández***

## DEDICATORIA

A **DIOS TODOPODEROSO** por darme la vida, sabiduría e inteligencia para llegar a esta etapa de mi vida, por darme la fortaleza y las esperanzas para lograr culminar una de mis metas, gracias por estar siempre cuando te he necesitado, por tu voluntad e infinita misericordia he logrado llegar al final de mi carrera universitaria.

A mi padre **Héctor Zepeda** por su apoyo incondicional, por su cariño, por su fe en mí, por su confianza, su sacrificio y por siempre estar ahí para darme ánimos en los momentos más difíciles, muchas gracias, te amo.

A mi madre **Verónica Castro** por su apoyo, sus consejos, por iluminar mi vida, por los principios y valores que inculco en mí, a pesar de las dificultades siempre me dio todo para poder seguir adelante, dándome fuerzas y ánimos en todo momento, te amo.

A mi hermana **Gabriela Alejandra Zepeda** por ser mi ayuda indispensable durante todos estos años, por ser el ejemplo de persona trabajadora y honesta a seguir, por cuidarme y apoyarme siempre, tu eres una de mis motivaciones más grandes para llegar a esta meta.

A mi cuñado **Martin Rivera** por su apoyo en todo momento, por estar siempre disponible en los momentos que lo necesite, muchas gracias.

A mis hermanos **Katherine, Michelle y Manuel** por compartir buenos momentos y bonitas experiencias conmigo.

A mis compañeras y amigas **Karla Janeth y Karla Noemi**, la vida no me pudo dar mayor bendición que tenerlas a ustedes como amigas, muchas gracias por todo el apoyo, comprensión y tolerancia que tuvieron conmigo, gracias por todos los momentos y experiencias que pasamos juntos, las quiero mucho, que esta nueva etapa de nuestras vidas sea de mucha bendición.

A los señores **Carlos Escalante y Janeth Cerritos** por todo el apoyo brindado desde el principio de esta investigación, gracias por su hospitalidad y por sus ánimos.

A todas las personas, **familiares y amigos** que estuvieron involucradas en este proceso de mi formación universitaria y que tuvieron fe en mí.

**ALEJANDRO ZEPEDA**

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
1.0 CAPITULO I: CONSIDERACIONES GENERALES .....	3
1.1 ANTECEDENTES.....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.3 OBJETIVOS.....	10
1.4 ALCANCES.....	11
1.5 LIMITACIONES.....	12
1.6 JUSTIFICACIÓN .....	13
2.0 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 INTRODUCCIÓN .....	14
PRIMERA ETAPA.....	16
2.2 GEOLOGÍA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR .....	16
2.2.1 FORMACIONES GEOLÓGICAS EN EL AMSS.....	17
2.2.2 ORIGEN DE LOS DIFERENTES ESTRATOS Y MATERIALES QUE COMPONEN EL AMSS. ....	19
2.2.3 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE MATERIALES GEOLÓGICOS DEL AMSS.....	34
2.3 GENERALIDADES SOBRE MAPAS .....	42
2.3.1 MAPAS EN EL SALVADOR UTILIZADOS EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA CIVIL. ....	44
2.4 MAPAS GEOTÉCNICOS.....	46



SEGUNDA ETAPA .....	53
2.5 CAMPAÑA GEOTÉCNICA.....	53
2.6 LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS GEOTÉCNICAS NACIONALES E INTERNACIONALES. ....	64
2.6.1 NORMA TÉCNICA SALVADOREÑA (1997).....	64
2.6.2 NORMA TÉCNICA DE COSTA RICA (2001).....	68
2.6.3 NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (2014).....	69
2.6.4 NORMA TÉCNICA CHILENA (2014) .....	71
2.6.5 NORMA TÉCNICA ESPAÑOLA.....	71
2.6.6 NORMA GUATEMALTECA (2010) .....	73
2.6.7 NORMA COLOMBIANA (1998) .....	74
3.0 CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	77
3.1 INTRODUCCIÓN .....	77
3.2 METODOLOGÍA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	78
3.2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	78
3.2.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA ELABORAR UN MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS. ....	78
3.2.3 ELABORACIÓN DE BASE DE DATOS .....	81
3.2.4 CONSIDERACIONES PARA ELABORAR LA BASE DE DATOS... ..	82
3.2.5 USO DE SOFTWARE PARA CORRECCIÓN DE ERRORES .....	83
3.2.6 GENERACIÓN DE MAPAS .....	83

3.2.7	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS. ....	83
3.3	METODOLOGÍA APLICADA EN LA INVESTIGACIÓN .....	84
3.3.1	DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	84
3.3.2	REQUERIMIENTO MÍNIMO PARA ELABORAR UN MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS .....	85
3.3.3	ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS. ....	87
3.3.4	CONSIDERACIONES REALIZADAS EN LA BASE DE DATOS. ....	88
3.3.5	USO DE SOFTWARE gINT Logs.....	91
3.3.6	GENERACIÓN DE MAPAS .....	95
3.3.7	SOFTWARE DE MODELACIÓN DE MAPAS .....	96
3.4	MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS .....	119
4.0	CAPITULO IV: PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS .....	124
4.1	INTRODUCCIÓN .....	124
4.2	EDIFICACIONES .....	125
4.2.1	REQUERIMIENTOS MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA EDIFICACIONES, ESTABLECIDOS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS. ....	129
4.2.2	LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS INTERNACIONALES .....	152
4.2.3	ENTREVISTAS A ESPECIALISTAS EN EL ÁREA DE GEOTECNIA. 164	
4.3	URBANIZACIONES .....	166

4.3.1	REQUERIMIENTOS MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA URBANIZACIONES, ESTABLECIDOS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS. ....	166
4.3.2	LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS INTERNACIONALES .....	170
4.3.3	ENTREVISTAS A ESPECIALISTAS EN EL ÁREA DE GEOTECNIA. ....	175
4.4	OBRAS DE PROTECCIÓN.....	177
4.4.1	GAVIONES .....	179
4.4.2	SOIL NAILING .....	190
5.0	CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	202
5.1	INTRODUCCIÓN .....	202
5.2	ESTUDIOS DE SUELOS .....	203
5.3	ANÁLISIS DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS. ....	204
5.3.1	MAPAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD .....	205
5.3.2	MAPAS DE COMPACIDAD DE SUELOS.....	213
5.3.3	MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	219
5.4	PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS. ....	225
5.4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES .....	225
5.4.2	URBANIZACIONES .....	242
5.4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA OBRAS DE PROTECCIÓN .....	249
6.0	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	261

6.1	INTRODUCCIÓN .....	261
6.2	CONCLUSIONES .....	262
6.2.1	ESTUDIOS DE SUELOS .....	262
6.2.2	MAPA DE CARACTERISTICAS GEOTÉCNICAS .....	262
6.2.3	PROPUESTA DE REQUEMIMIENTOS MÍNIMOS PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN Y EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES. ....	263
6.3	RECOMENDACIONES .....	267
6.3.1	ESTUDIOS DE SUELOS .....	267
6.3.2	MAPAS DE CARACTERISTICAS GEOTÉCNICAS .....	268
6.3.3	PROPUESTA DE REQUEMIMIENTOS MÍNIMOS PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN Y EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES. ....	268
	BIBLIOGRAFÍA.....	272
	ANEXOS.....	277

## INTRODUCCIÓN

Esta investigación consiste en la elaboración del mapa de características geotécnicas del municipio de San Salvador y de una propuesta de requerimientos mínimos en estudios de suelos para urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles.

Para alcanzar este propósito en primer lugar se describirá la geología del área en estudio, el origen de sus principales estratos, formaciones geológicas, edades y unidades litológicas. De la misma manera se presenta algunas propiedades ingenieriles del suelo, donde se realiza una recopilación de valores geotécnicos provenientes de ensayos de corte directo (CD) y compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos Q (U, U), con el fin de tener valores de referencia de parámetros geotécnicos de la zona.

Por otra parte, se desarrolla las fases para el planeamiento de un programa de exploración del subsuelo que conformará la campaña geotécnica. Luego se revisan los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales (para la planificación de dicha campaña (número, ubicación y profundidad de sondeos), con el objetivo de conocer los criterios que estos países toman en cuenta para la planificación de la campaña geotécnica.

Se describe la aplicación de la metodología para la elaboración del mapa de características geotécnicas, el procedimiento a seguir y el software a utilizar.

Luego para definir los lineamientos mínimos que deben contener los estudios geotécnicos, se realiza una revisión de literatura geotécnica, normativas y

entrevistas a especialistas, orientado a urbanizaciones, obras de protección y edificaciones de tres y más niveles.

Se realiza el análisis de resultados del mapa de características geotécnicas y de la propuesta de requerimientos mínimos, finalizando con la presentación de las conclusiones y recomendaciones.

## **1.0 CAPITULO I: CONSIDERACIONES GENERALES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Un mapa es una representación geométrica plana, simplificada y convencional, de toda o parte de la superficie terrestre que se puede entender según los propósitos que intervinieron en su preparación. Tiene un orden jerárquico de valores y constituyen hoy una fuente importantísima de información en diferentes ámbitos de aplicación.

Actualmente en El Salvador se cuenta con los siguientes tipos de mapas: topográficos, geológico, de vegetación, de riesgos hidrológicos, susceptibilidad a deslizamientos, geomorfológico y mapa de uso de suelos, entre otros; los que han sido elaborados por diferentes instituciones gubernamentales, sin embargo no se cuenta con un mapa geotécnico, que presente cartográficamente una caracterización global del terreno con datos de propiedades físicas y mecánicas del suelo así como de la ubicación de zonas problemáticas (por las características de los materiales), con fines de planificación y aptitud del terreno en diversos usos para proyectos de construcción y mantenimiento de obras de ingeniería; con información cuantitativa según su aplicación (cimentaciones en edificaciones, urbanizaciones y obras de protección, etc.).

Según Coelho (1980), los primeros intentos de realizar una representación cartográfica de las condiciones geotécnicas parecen haber surgido en 1913 en la exposición técnica de Leipzig. Gwinner, en 1954 y 1956, se realiza el primer intento de integrar la información sobre las propiedades físicas y comportamiento

mecánico de suelos en un contexto geológico. La mayor parte del desarrollo de la cartografía geotécnica se llevó a cabo en los países europeos orientales, desde la década de los 50.

La utilidad del mapa geotécnico en diferentes países, se toma como una herramienta para la planificación urbana; que son plasmados en los planes de desarrollo territorial de una ciudad, definiéndose así, la distribución de los usos del suelo en áreas más adecuadas.

Los mapas geotécnicos difieren de los geológicos en que los primeros muestran una descripción y clasificación geotécnica de suelos y rocas, así como también propiedades físico-mecánicas de los materiales e información interpretativa para futuras aplicaciones geotécnicas, en cambio los geológicos presentan información descriptiva de los materiales, edades, evolución y procesos geológicos, datos cuantitativos sobre las estructuras y medio geológicos.

La Misión Geológica Alemana (1978), desarrollo el mapa geológico de El Salvador a escala 1:15,000; identificándose que en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) pertenece a la unidad geológica llamada: Rocas volcánicas plio-pleistocénicas y holocénicas, las cuales comprenden los edificios volcánicos más jóvenes que se han establecido en el interior de la estructura del Graben Central los cuales se disponen paralelamente al eje del graben y evolucionaron inmediatamente después de la configuración del mismo.



La estratigrafía del AMSS está compuesta principalmente por la Formación San Salvador, los estratos más importantes son: TB4, G1, TB3, TB2, G2, IB, PL y TBJ siendo los depósitos de las Formaciones Cuscatlán y Bálsamo su basamento.

El Área Metropolitana de San Salvador, conocida por sus siglas, como AMSS, geográficamente, se ubica entre elementos representativos, como el Volcán de San Salvador, al poniente y la Caldera de Ilopango al Oriente. Al Sur se identifica la Cordillera el Bálsamo, y la ladera Loma Larga este último rodeando parte sur del municipio de San Marcos, encontrándose inmerso también el Domo de San Jacinto. Al norte se encuentra el cerro de Nejapa y parte del cerro Guaycume.

Con base al planteamiento desarrollado, es necesario la elaboración de un mapa de características geotécnicas el cual servirá a las entidades gubernamentales para planificar, evaluar e identificar las diferentes zonas problemáticas, así como también; servir como base para la generación de otros mapas, como por ejemplo un mapa riesgo sísmico.

Por otra parte en la construcción de obras civiles es importante conocer las características de los suelos para poder identificar zonas críticas de construcción y supervisar los lugares más adecuados para el desarrollo habitacional e industrial y así garantizar los niveles de seguridad y desempeño en las edificaciones, por lo tanto, para alcanzar este objetivo se requiere la realización de un estudio del subsuelo, el cual debería basarse al menos en los lineamientos que establece la Norma Técnica Salvadoreña para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes(1997), donde deben incluir un reporte geotécnico, que

tenga la siguiente información: Capacidad de carga admisibles, identificación y clasificación del suelos, condiciones de humedad, límites de consistencia, presencia de agentes contaminantes, Flujos de aguas subterráneas; así como también la definición de la profundidad mínima de desplante para cimentaciones. El estudio de suelo es un requerimiento de las instituciones que controlan el desarrollo urbano del AMSS, los cuales dependen de la ubicación, tipo y magnitud del proyecto de construcción a desarrollarse.

Por lo que el desarrollo de una propuesta mejorará la planificación de la campaña geotécnica (ubicación, número de sondeos, profundidad y espaciamiento de los mismos, tipo de ensayos, entre otros), estableciendo lineamientos mínimos que deben presentar los estudios de suelos de acuerdo al tipo de construcción civil, la que podría contribuir en un futuro para incorporarla a la Normativa Técnica Salvadoreña. Esto junto con la elaboración del mapa, sumaría a las herramientas ingenieriles existentes, contribuyendo de esta forma al desarrollo del país.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), ha experimentado un gran desarrollo económico, social, financiero e industrial y un crecimiento demográfico, por lo que han sido necesarias las construcciones de carreteras, edificios, viviendas, calles, puentes, entre otros. Tal situación requiere la planificación y control del desarrollo urbano de los municipios que conforman el Área Metropolitana de San Salvador. Un mejor conocimiento geotécnico permitirá una mejor investigación geotécnica, así como construcciones seguras y más económicas, disminuyendo la necesidad de hacer reparaciones futuras.

Este crecimiento acelerado que ha tenido el AMSS, sobretodo el municipio de San Salvador, que es centro político, social y económico del país ha requerido un desarrollo en el área de la construcción, las que necesitan un permiso, el cual es otorgado por la OPAMSS (Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador), debido a esto es importante conocer previamente las condiciones del suelo existente en la zona de interés; por lo que un mapa de características geotécnicas se hace necesario, ya que permitiría conocer a priori las propiedades físicas y mecánicas del suelo; así como las zonas de mayor riesgo para su uso y ocupación. De la misma manera serviría para regular las construcciones en zonas no adecuadas que en muchos casos tienen como efecto la formación de cárcavas y deslizamientos en época lluviosa o ante un sismo fuerte, provocar daños en estructuras afectando la seguridad de la población.

Para la elaboración del mapa se pretende retomar la información de estudios geotécnicos que poseen la OPAMSS u otras instituciones gubernamentales, sobre estudios de suelo que estos posean del área de interés que nos permitirá tener una visión clara del tipo de suelos existente a diferentes profundidades y de sus características geotécnicas; con ello brindar un mejor criterio para el prediseño del tipo de cimentaciones (superficiales o profundas) de las diferentes infraestructuras a construirse, además de proporcionar una idea del tipo de suelo y de los posibles valores esperados en un estudio de suelo en un lugar en particular

En nuestro medio existe una notable deficiencia en los lineamientos que la normativa geotécnica proporciona, estipulando de manera general los parámetros a tomar en cuenta para la planificación de la campaña geotécnica, dejándola a juicio y experiencia propia del ingeniero geotécnista. Esto genera dificultades debido a los distintos criterios que se pueden tener a la hora de obtener los parámetros requeridos, además de la importancia que se tiene en la diversidad de obras civiles que existen. Ante ello surge la necesidad de elaborar una propuesta de los requerimientos mínimos para los estudios de suelo, condicionando los parámetros a evaluar según la magnitud de la obra y complejidad geotécnica; siendo necesario revisar los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales que permita elaborar una propuesta de parámetros mínimos a presentar en estudios para urbanizaciones, obras de protección , edificaciones de tres y más niveles, y de esta forma, sirva

como referencia para evaluar los estudios que se presenten en las instituciones que se encarguen de otorgar permisos de construcción.

Con esta investigación se pretende contribuir en el país, en la solución de muchos problemas por construcciones en zonas no adecuadas, contribuyendo así a una mejor planificación urbana, ordenando el uso de los suelos, evitando de esta forma, problemas generados por intervenciones antrópicas en zonas no aptas

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

- Elaborar un mapa de características geotécnicas del municipio de San Salvador y propuesta de requerimientos mínimos necesarios en estudio de suelos para urbanizaciones y obras de protección, edificaciones de tres y más niveles.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar los archivos de instituciones gubernamentales que posean estudios de suelos para elaborar la base de datos.
- Realizar un análisis de los parámetros geotécnicos a considerar en los estudios de suelos para la elaboración de la base de datos.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas requeridas para elaborar el mapa de características geotécnicas a partir de la base de datos.
- Utilizar el software ArcGIS u otros programas afines que faciliten la elaboración del mapa geotécnico.
- Revisar los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales para la planificación de la campaña geotécnica de urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles.
- Establecer los requerimientos mínimos que deben contener los estudios de suelos con base al tipo de cimentación, en urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles.

#### **1.4 ALCANCES**

- En la investigación se creará una base de datos con estudios de suelos proporcionados por la OPAMSS u otras instituciones, que se hayan realizado en el municipio de San Salvador, con la finalidad de elaborar un mapa de características geotécnicas que muestre las propiedades físico-mecánicas del suelo, utilizando el software ArcGIS u otro disponible como herramienta para modelar dicho mapa.
- Elaborar una propuesta de los requerimientos mínimos necesarios que debe contener los estudios de suelos para urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles, mediante una revisión de los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales para una mejor planificación de la campaña geotécnica.

### **1.5 LIMITACIONES**

- No se realizarán ensayos de campo y laboratorio de los suelos del municipio de San Salvador que contrasten la verificación de los parámetros geotécnicos de los estudios de suelo proporcionados por las instituciones gubernamentales, ya que el mapa se basará en la calidad de estudios de suelos usados.
- Disponibilidad de la OPAMSS u otras organizaciones gubernamentales de brindar toda la información requerida para el trabajo de investigación.
- Existen sectores en el municipio de San Salvador que podrían no tener estudios geotécnicos.
- La gama de la construcción se subdivide en muchos campos por lo que la investigación se limitará a analizar obras de protección, urbanizaciones, edificaciones tres y más niveles, para establecer la propuesta de los requerimientos mínimos que debe de llevar un estudio de suelos.
- Las normativas geotécnicas a utilizar en la propuesta de requerimientos mínimos para los estudios de suelo en las urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles, serán normas nacionales e internacionales con características geológicas similares a las del área en estudio, ya que éstas son las que aportan información acerca de los parámetros geotécnicos a evaluar en un estudio de suelos.



## **1.6 JUSTIFICACIÓN**

El municipio de San Salvador no cuenta con un mapa de características geotécnicas que les permita a las entidades gubernamentales conocer previamente la distribución del uso del suelo, por lo que se considera necesario en la toma de decisiones al evaluar la factibilidad en el desarrollo de proyectos, evitando así construcciones en lugares no adecuados o colindantes a estos, que pongan en riesgo a la población ante un evento climático o sísmico.

Por otra parte, la carencia de información que la norma Técnica Salvadoreña para Cimentaciones establece, respecto a la exigencia de requerimientos que deben presentarse en estudio de suelos, la cual deja a juicio del especialista los lineamientos a realizar en la campaña geotécnica; hace necesario elaborar una propuesta de los requerimientos mínimos que los estudios de suelos deben presentar para urbanizaciones, obras de protección, edificaciones de tres y más niveles, apoyándonos en normativas nacionales e internacionales, revisando que estas posean características geológicas similares de las zonas en estudio, con el objetivo de mejorar la planificación de la campaña geotécnica (ubicación, número de sondeos, tipo de ensayos, entre otros), y de esta forma proporcionar un aporte para fortalecer los lineamientos mínimos requeridos en nuestro país.

## **2.0 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentará el marco teórico de la investigación, el cual, para lograr una mejor comprensión del lector, se divide en dos etapas. En la primera etapa se describe la geología del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), el origen de sus principales estratos, formaciones geológicas, edades y unidades litológicas, enfatizando la Tierra Blanca Joven (TBJ), producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango, siendo el estrato más reciente en el cual se asentó la mayor parte del AMSS. De la misma manera se presenta algunas propiedades geotécnicas de los materiales geológicamente más superficiales del AMSS, así como también su respectiva descripción de estos en la zona de estudio. También se considera necesario conocer propiedades ingenieriles del suelo (físicas y mecánicas), por lo que se hace una recopilación de valores geotécnicos provenientes de ensayos de corte directo (CD) y compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos Q(U,U), con el fin de tener valores de referencia de parámetros geotécnicos de la zona.

Los parámetros geológicos-geotécnicos de los materiales que componen el AMSS, serán plasmados en el mapa de características geotécnicas, el cual se abordara de manera más amplia en el capítulo tres, por lo que en esta sección se describen las generalidades sobre mapas, profundizando más a detalle en mapas geotécnicos-

La segunda etapa consiste en dar a conocer los requerimientos mínimos que deben tener los estudios de suelos, se define que es una campaña geotécnica, sus objetivos y sus fases para el planeamiento de un programa de exploración del subsuelo. Luego se revisan los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales (Costa Rica, Ecuador, Chile, España, Guatemala, Colombia) para la planificación de dicha campaña (número, espaciamiento y profundidad de sondeos), con el objetivo de conocer los criterios que estos países toman en cuenta para la planificación de la campaña geotécnica.

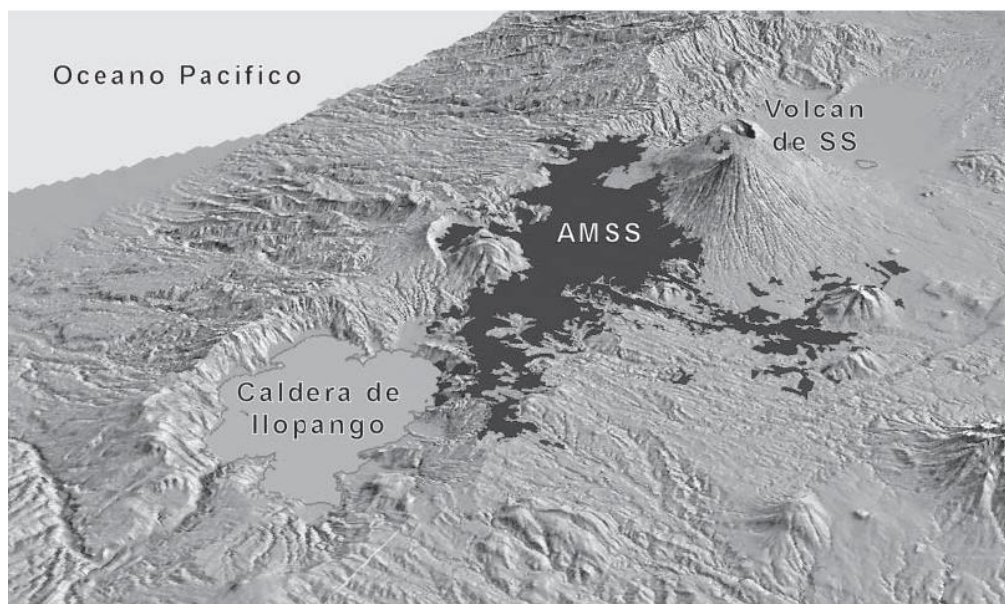
## **PRIMERA ETAPA**

### **2.2 GEOLOGÍA DEL AREA METROPOLITANA DE SAN SALVADOR**

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), está situada entre el volcán San Salvador y La Caldera de Ilopango, ambos separados entre sí por 22 km (Ver figura No.2.1). El domo San Jacinto se localiza contiguo al borde occidental de Ilopango y al relicto de Caldera de Planes de Renderos. El cráter de explosión Plan de la Laguna (PL) yace contiguo a la cordillera del Bálsamo (Hernández, 2008).

En el AMSS afloran materiales piroclásticos provenientes de varios centros eruptivos tales como Coatepeque, Caldera de Ilopango, complejo volcánico San Salvador, Plan de la Laguna, caldera Planes de Renderos y productos lávicos de los domos San Jacinto, Cuscatancingo, El Rosal y los del Ilopango, además de los conos de El Carmen y Ayutuxtepeque. Todo ese conjunto de depósitos piroclásticos y lávicos, estructuras volcánicas asociadas, además del fallamiento existente, generan condiciones geológicas complejas; además está formada por los estratos que son producto de la Caldera de Ilopango: TB4, TB3, TB2 y su última erupción pliniana TBJ (Tierra Blanca Joven), además presenta la unidad G1, G2 e IB (Ignimbritas Boquerón), siendo estas pertenecientes al Volcán San Salvador. Así como también se menciona la erupción del Plan de la Laguna (PL).

**Figura No. 2.1.** Mapa de relieve del AMSS rodeado por el Volcán de San Salvador y Caldera de Ilopango.



FUENTE: Fotografía extraídas de: Chávez et al., (2012): Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. Rev. Geol. Amér. Central, 47:117-132.

### 2.2.1 FORMACIONES GEOLÓGICAS EN EL AMSS.

La secuencia geológica de la zona de estudio, en orden de aparición está compuesta por las Formaciones Bálsamo (Mioceno Tardío al Plioceno), Cuscatlán (Plioceno Superior-Pleistoceno) y San Salvador (Pleistoceno Superior a Holoceno), a continuación, se describen de la más antigua a las más recientes:

- Formación Bálsamo: está constituida por lavas basáltico-andesíticas, rocas epiclastitas, tobas de materiales piroclásticos y brechas. Estos materiales afloran en la Cordillera del Bálsamo, con más de 100 m de

espesor y en el Cerro de Guazapa, remanentes de antiguas calderas y estratovolcanes (Caldera de Jayaque, Estratovolcán Panchimalco, Antiguo de Ilopango y Volcán Guazapa). (Lexa et al., 2011; Ferres, 2014). La Formación el Bálsamo el elemento principal en la estructura de la Cordillera del Bálsamo al sur del Graben Central (Lexa et al., 2011).

- Formación Cuscatlán: Está representada por las Calderas Jayaque y Santo Tomás, las ignimbritas andesíticas/dacíticas de Ilopango y las ignimbritas de Jayaque en la parte SO y SE del área, el volcán andesítico de Ilopango, el volcán basáltico Loma Larga, la Caldera Planes de Renderos, los domos extrusivos dacíticos/andesíticos de San Jacinto y el cono efusivo, el cono de toba/escoria de San José, los domos extrusivos de la Caldera de Ilopango , el cono de escoria de Antiguo Cuscatlán y los depósitos de tefra inferiores de las calderas de Coatepeque e Ilopango expuestos a lo largo de las fallas marginales del Graben Central (Lexa et al., 2011).
- Formación San Salvador: está formado por una serie de rocas piroclásticas y epiclásticas amarillentas-café, de grano fino, de composición félsica (tobas color café), con espesores máximos de 25.0 m. Las rocas más jóvenes son lavas basáltico-andesíticas y la alternancia de depósitos piroclásticos y epiclásticos de color claro y naturaleza félsica (“Tierras Blancas”) con rocas efusivas de basálticas a andesíticas (Ferres,

2014). Representada por las tefras del volcán San Salvador, calderas de Ilopango y Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna.

## 2.2.2 ORIGEN DE LOS DIFERENTES ESTRATOS Y MATERIALES QUE COMPONEN EL AMSS.

- Caldera de Ilopango

La Caldera de Ilopango, ocupada por un lago de 74 km<sup>2</sup>, se desarrolló en diversas fases eruptivas durante las cuales tuvieron lugar más de una docena de erupciones explosivas plinianas, freatoplinianianas y ultraplinianas.

La última fase eruptiva de la caldera de Ilopango está representada por los productos félsicos de cuatro erupciones explosivas plinianas, ocurridas durante los últimos 40,000 años. Se trata de depósitos de caída, oleada piroclásticas e ignimbritas denominadas genéricamente Tierras Blancas (TB) por su coloración clara, lo cual permite que constituyan excelentes marcadores estratigráficos (Ferres, 2014).

Hernández (2008) hace una descripción de los depósitos de Tierra Blanca que produjeron los depósitos de caída e Ignimbritas pumíticas, más superficiales, denominados de la más antigua a la más joven como TB4, TB3, TB2 y TBJ (Ver figura No. 2.2).

**Pómez TB4:** El depósito más antiguo del último ciclo de la caldera de Ilopango, el cual yace sobre las tefras Apopa. Constituido por una capa de pómez color

blanco, se caracteriza por tener una capa lapilli de pómez con gradación normal y por tener mayor espesor que los otros depósitos.

**Pómez TB3:** Es un pómez y cenizas de caída de granulometría fina, blanca con presencia de lapilli acrecional y flujos piroclásticos basales lo que señalan fenómenos eruptivos freatomagmáticos originados por la interacción entre el magma y las aguas de un antiguo lago.

**Pómez TB2:** Este depósito tiene espesor de 1 m dentro de un radio de 10 km del centro de emisión, está compuesto por una caída de pómez ligeramente mayor que TB3 y caracterizado por ser mal seleccionado con abundantes minerales oscuros representados por hornblenda. El techo presenta un paleosuelo de delgado espesor, de color café oscuro.

**Figura No. 2.2.** Estratigrafía casi completa de la formación de San Salvador.



FUENTE: Fotografía extraídas de: Hernández, E. W., (2008). Diapositivas de “Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica” SNET.



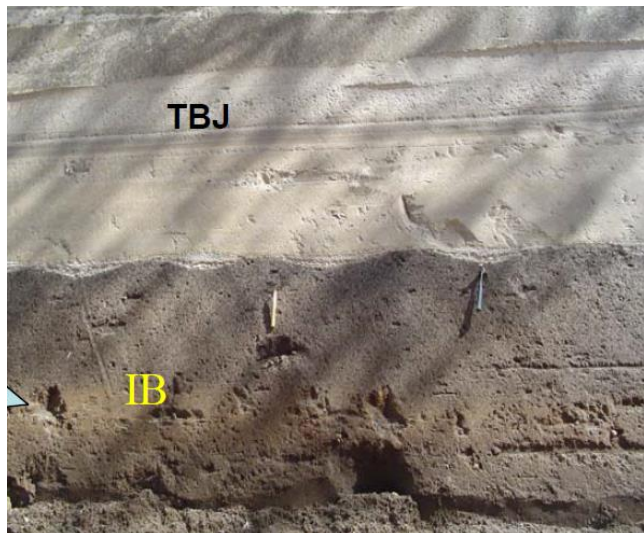
La última erupción pliniana de la caldera de Ilopango, la cual cubrió la mayor parte del AMSS, es conocida como Tierra Blanca Joven (TBJ), y es el estrato superficial en el cual se asentó el Área Metropolitana, estando dividida en diferentes unidades que conforman dicho estrato.

En el desarrollo de la presente investigación se describen las diferentes unidades que conforman las TBJ desde la más antigua a la más reciente, a excepción de la tabla No. 2.1 donde se muestra el perfil de unidades geotécnicas de la más reciente a la más antigua.

**Tierra Blanca Joven (TBJ):** Las tefras Tierra Blanca Joven en el área metropolitana de San Salvador, son el producto de la última erupción pliniana de la Caldera de Ilopango (536 D.C., Dull et al., 2010) constituyendo el cierre del ciclo eruptivo que inicio con TB4 y finalizó con TBJ. La última erupción efusiva del Ilopango corresponde al emplazamiento de lavas de composición riolítica que dio origen a las islas Quemadas entre diciembre de 1879 y marzo de 1880 (Goodyear, W., 1880).

De acuerdo a la descripción de (Hernández, 2004) las TBJ están constituidos principalmente por fragmentos de vidrio volcánico que forman las cenizas de tamaño arena fina y limo (muy abundante), fragmentos de pómez y líticos (tamaño grava, arena y bloques), polvo volcánico (arcilla no plástica) y cristales en menor cantidad (tamaño arenas y limos). (Ver figura No. 2.3)

**Figura No. 2.3.** Material volcánico TBJ e IB en Diego de Holguín.



FUENTE: Fotografía extraídas de: Hernández, E. W., (2008). Diapositivas de “Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica” SNET.

La secuencia piroclástica de la Tierra Blanca Joven (TBJ) está clasificada en las unidades vulcanológicas desde la A hasta la G incluyendo ignimbritas alfa y beta. Hernández, (2004) las reagrupa de acuerdo a características similares y las define en cuatro unidades geotécnicas, denominadas de la base hacia el techo: Unidad I que incluye las unidades vulcanológicas A, B y C; la Unidad II comprende la Unidad D, Unidad III comprende la E y las ignimbritas Alfa, Beta y F, la Unidad IV corresponde a la G. (Ver tabla No. 2.1). De estas unidades geotécnicas, la Unidad III, es la que mejores propiedades geomecánicas presenta para la estabilidad de taludes.

TABLA No. 2.1 Perfil de unidades geotécnicas TBJ.

	UNIDADES VULCANOLÓGICAS	UNIDADES GEOTÉCNICAS	LEYENDA
<b>Unidad G</b> Secuencia de ignimbritas y coignimbritas de delgados espesores		IV	Suelos SM y ML, no cohesivos, resistencia por fricción, muy poco cementada. Susceptibles a la erosión. Cementación parcial en ignimbritas. ( $c=0.032-0.122\text{kg/cm}^2$ y $\phi=28.43^\circ-25.57^\circ$ ).
<b>Unidad F</b> Múltiples ignimbritas		III	Incluye unidad F, ignimbrita Beta, unidad E e ignimbrita Alfa. Suelos SM con gravas y bloques de pómez. Relativamente bien graduada, cementación parcial por minerales. Ángulos de fricción altos. Cohesión baja y variable de 0.105 a 0.025 kg/cm <sup>2</sup> . Susceptibles a la erosión. Grandes espesores. Taludes verticales por presencia de discontinuidades. La unidad E posee la cohesión más alta 1.615 kg/cm <sup>2</sup> .
<b>Subunidad ignimbrita Beta</b>			
<b>Unidad E</b> Depósitos húmedos y secos			
<b>Subunidad ignimbrita Alfa</b>		II	Suelos ML con poca pómez diseminados. Depósitos de caída muy finos bandeados por variaciones granulométricas con abundantes lapilli acrecional. No cohesivos. Básicamente la succión opera como fuerza resistiva. Ángulos de fricción relativamente moderados. Deleznables, granulometría relativamente uniforme. ( $c=0.778$ a $0.062\text{ kg/cm}^2$ y $\phi=38.15^\circ$ a $31.37^\circ$ )
<b>Unidad D</b> Depósitos de caída finos, oleadas piroclásticas e ignimbritas			
<b>Unidad C</b> Ignimbrita amarilla y oleadas piroclásticas. Ignimbrita Gris			
<b>Unidad B</b> Pómez de caída			
<b>Unidad A</b> Depósito de caída inicial		I	Suelos SM y ML, compuesta por la unidad C y los delgados depósitos A y B. Flujos piroclásticos parcialmente cementados. Suelos relativamente bien graduados. ( $c=1.001-0.290\text{ kg/cm}^2$ y $\phi=28.15^\circ$ a $43.46^\circ$ )

FUENTE: Hernández, E. (2004). Características geomecánica y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango. El Salvador. Tesis de Maestría en Tecnologías Geológicas. Universidad Politécnica de Madrid.

### **Estratigrafía de la TBJ**

A continuación, se presenta una breve descripción de las unidades de depósitos piroclásticos de caída y flujos que constituyen a la TBJ (Ver tabla No. 2.2), según (Hernández, 2004), como se observa en las figuras Nos. 2.4 y 2.5.

**Figura No. 2.4.** Talud casi vertical de Tierra Blanca Joven (TBJ) que se mantienen debido a la succión y cementación.



FUENTE: Fotografía proporcionada por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

**Figura No. 2.5.** Talud de Tierra Blanca Joven (TBJ)



FUENTE: Fotografía proporcionada por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

**TABLA No. 2.2** Unidades que forman parte de los depósitos TBJ de la más antigua a la más superficial.

UNIDAD	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES	ESPESOR
<i>A y A<sub>0</sub></i>	Depósitos de caída inicial y oleada piroclástica respectivamente. Es un depósito fino, granular y localmente disperso de color café, compuesto por abundantes pómez y líticos.	≤10 cm
<i>B</i>	Depósitos de caída de pómez de tipo pliniano. Contenido por cenizas gruesas basales y lapilli de caída en el techo, color amarillento.	≤10 cm
<i>IG</i>	Ignimbrita gris, en parte cementado por sulfatos y silicatos de cloruro de sodio, por lo tanto, más consolidado.	Hasta 9 m
<i>C</i>	Compuesto por dos flujos piroclásticos, Ignimbritas color gris en base, rico en líticos andesíticos, masivo, de poco desplazamiento.	Casi 10 m
	Ignimbritas de color amarillento y rico en líticos hidrotermalizados, fragmentos de pómez. En la zona sur del área de Ilopango posee granulometría más gruesa, pero está parcialmente cementada por sulfatos y silicatos de cloruro de sodio, por eso, está relativamente más consolidada.	Hasta 9 m
<i>D</i>	Depósito de ceniza fina, con presencia de pómez, lapilli acrecional, no consolidado en las zonas distales y media, pero cementado en la zona proximal.	≤ 8 m
<i>α</i>	Flujo piroclástico con una matriz rica de cenizas finas, pómez y líticos, cementada en la base por sulfatos y silicatos, el resto de la unidad es no consolidada. El sector entre Ilopango y Soyapango aflora una Ignimbrita masiva, con techo de color rosado tenue y beige en todo el depósito.	≤ 15 m
<i>E</i>	Depósitos de surges u oleadas piroclásticas secos y húmedos Los depósitos secos son color claro, están compuestos por cenizas gruesas con lapilli fino pumítico y líticos andesíticos (gravas y arenas), no consolidadas, bastante deleznales. Los depósitos húmedos están constituidos por cenizas muy finas, color café claro y café oscuro cuando están húmedos, se caracterizan por estar bastante consolidados y son ricos en fragmentos vítricos y en cristales.	≤ 3 m
<i>β</i>	Flujo piroclástico compactado con abundante matriz fina, pómez y presencia moderada de líticos. Ignimbritas de color café claro, muy compacto, matriz fina con pómez y líticos en moderada presencia. Se localiza en el techo de Unidad E y subyace a la Unidad F.	≤ 4 m
<i>F</i>	Depósitos caóticos de flujo de pómez, los bloques de pómez se concentran en la parte superior y los líticos en la parte inferior. Matriz de ceniza gruesa con abundantes fragmentos de pómez y líticos.	Desde ≤1m en las elevaciones (a 8-12 km de distancia de la caldera). Hasta 20-60 m cerca de la caldera.
<i>G</i>	Tobas finas con lapilli acrecional, depósitos de co-ignimbritas y flujos piroclásticos. Coignimbritas poco consolidadas con material fino, líticos, pómez y gran cantidad lapilli acrecional. El conjunto da un aspecto estratificado debido a los cambios granulométricos y en la estación lluviosa adoptan tonalidades claras y beige.	≤15 m cerca de la caldera, hasta menos de 1 m a 20 km de distancia.

FUENTE: Chávez et al., (2012): Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. Rev. Geol. Amér. Central, 47:117-132.

- Complejo volcánico de San Salvador

Está constituido por un estrato volcán central compuesto por el volcán joven y activo Boquerón, en el interior del antiguo Volcán de San Salvador, y por 25 edificios volcánicos monogenéticos asociados principalmente conos de escoria, que por lo general no superan los 100 m de altura, con excepción de El Playón con 160 m de altura (Ver figura No. 2.6). Se encuentra al noreste de la ciudad capital San Salvador, en la cual se destacan tres elevaciones prominentes: El Picacho, que es la parte más elevada con 1967 m.s.n.m. y se encuentra en el sector noreste del complejo, El Boquerón (1880 m.s.n.m.) que es donde se encuentra el cráter central del volcán, y el Cerro El Jabalí (o Amatepec) con 1397 m.s.n.m.

El registro estratigráfico del complejo volcánico de San Salvador hay depósitos de 49 erupciones de diferente tipología, en el periodo de los últimos 36,000 años. 25 de estas erupciones ocurridas en los últimos 10,000 años generaron volcanes monogenéticos de tipo cono de escoria y cráteres de explosión. (Ver figura No. 2.6), 15 de las 24 erupciones con origen en el cráter central del volcán el Boquerón fueron de pequeña magnitud de tipo efusivo o estromboliano, representadas mayormente por flujos de lava de composición basáltico-andesítica hasta andesítica (Ferrés, 2014). La última erupción fue en 1917, hace 100 años.

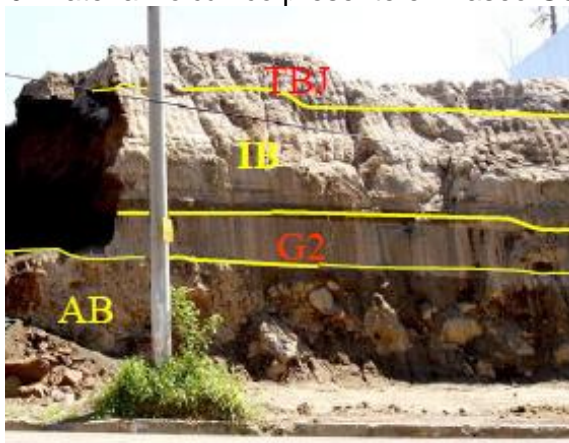
La estratigrafía del AMSS proveniente del Volcán de San Salvador está compuesta según (Hernández, 2008) por la erupción pliniana G1 denominada así

por el Consorcio Salvador, (1988), con fase inicial dacítica, es la más grande que se conoce de este volcán. La erupción que generó este depósito produjo la estructura caldérica de forma elíptica de 6 km por 4.5 km de diámetro. Estos depósitos G1 están compuestos por pómez de caída vesiculado, de composición dacítico a andesítico, grisáceo, algo suelto, con moderada presencia de líticos oxidados y angulares. Estratigráficamente se localiza sobre TB4 y debajo de TB3. G2 está compuesto por escorias poco vesiculadas por consiguiente más densa, afanítica, gris claro a gris pardo, mostrando mezcla de magmas. La granulometría indica que es un material poco seleccionado y caracterizado por la poca presencia de finos.

**Ignimbrita Boquerón (IB).** Está compuesta por dos flujos piroclásticos de color café oscuro mostrando cada una intercalación de delgadas oleadas piroclásticas (surges) de color café claro a pardo. Poca consolidación, posee matriz de cenizas finas medianamente meteorizadas, en la que se encuentran fragmentos de escoria gris con meteorización baja, fragmentos de escoria juveniles de tamaños variados y líticos andesíticos con oxidación, además, muestra pequeños bolsones de escoria bastante vesicular.

En la figura No. 2.6 se puede observar algunos estratos de los materiales volcánicos que conforman la superficie del AMSS, siendo estos nombrados desde la base lo superficial: Andesita Boquerón (AB), G2, Ignimbrita Boquerón (IB) y Tierra Blanca Joven (TBJ).

**Figura No. 2.6.** Material volcánico presente en Paseo General Escalón



FUENTE: Fotografía extraídas de: Hernández, E. W., (2008). Diapositivas de “Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica” SNET.

- Plan de La Laguna

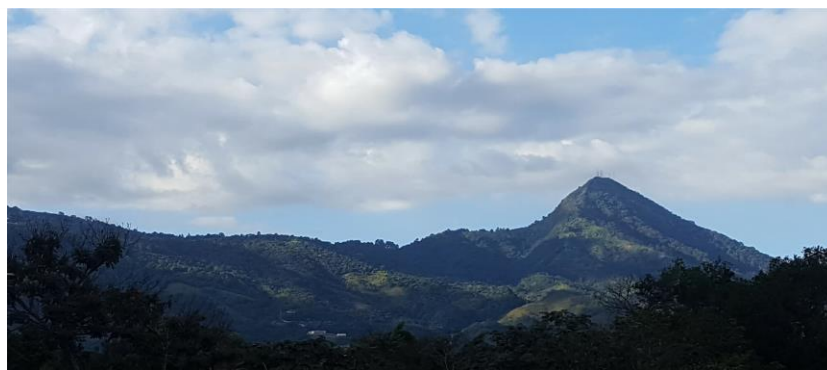
El primer evento eruptivo de tipo monogenético del periodo de los últimos 3,000 años corresponde a la erupción del mar Plan de la Laguna, es un centro eruptivo de 700 m de diámetro, que generó depósitos de caída y oleada piroclástica emplazados principalmente al S de la planicie de San Salvador y sobre la Sierra del Bálsamo. (Ferres, 2014). Se caracteriza por tener en la base lapilli andesítico, vesicular gris, superpuesto por oleadas. La parte intermedia laminada compuesta por cenizas de caída y oleadas.



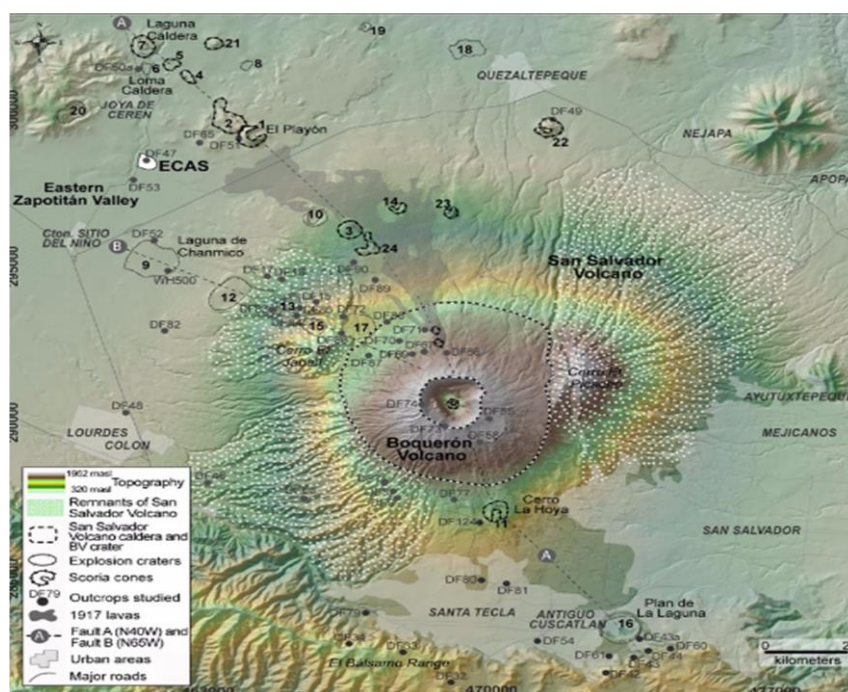
La base del cráter se encuentra entre 20 y 30 m por debajo de la superficie del terreno circundante y actualmente está ocupada por el Jardín Botánico de San Salvador y por un polígono industrial. (Ver figura No. 2.7)

**Figura No. 2.7** El complejo volcánico de San Salvador consiste en el volcán activo más joven (Boquerón), anidado dentro del antiguo volcán San Salvador y 25 conos secundarios.

a)



b)



FUENTE: Fotografía extraídas de: a) De los autores; b) Ferrés et al., (2011). Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archeological site: a review based on tephrostratigraphy. Bull Volcanol 73:833–850.

- Lago de Coatepeque

Se ubica justo al este del Volcán de Santa Ana. Tiene una elevación de 745 m.s.n.m., su área es aproximadamente 30 km<sup>2</sup>, y ocupa una depresión vulcano-tectónica que mide aproximadamente 11 km hacia el noreste y 7 km hacia el noroeste. Dicha depresión se formó por el hundimiento de una serie de volcanes preexistentes que se supone fue debido al vaciamiento de la cámara magmática en parte por la migración del magma hacia el Volcán de Santa Ana, pero la razón principal fue una serie de fuertes erupciones. En resumen, se trata de una caldera de hundimiento, presenta un espesor de 67 cm. Las cenizas compuestas por arenas medias a finas de pómez con biotita característica, tienen color beige claro amarillento, algo consolidado (Hernández 2008).

- Domo San Jacinto.

Remanentes de la Caldera los Planes de Renderos, con un diámetro de 4 km, ocurren en la zona central del volcán Loma Larga. La mayor parte de la caldera está constituida por los domos extrusivos y cono efusivo de San Jacinto (Ver figura No. 2.8).

La morfoestructura de la Caldera de Planes de Renderos es clasificada como zona de muy alta probabilidad de ocurrencia de sismos. Debido a la alta afectación tectónica que esta morfoestructura ejerce en el Cerro San Jacinto existe una red de fallas densa que pasan por dicho domo dacítico. Por lo que existe una alta probabilidad de que el centro histórico de la capital de San Salvador este ubicado sobre las fallas caldericas de esta morfoestructura (Šebesta, 2007).

**Figura No. 2.8** Vista al Volcán Loma Larga, Caldera Planes de Renderos, San Jacinto domo extrusivo y cono efusivo desde noroeste.



FUENTE: Fotografía extraídas de: Lexa et al., 2011. Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. -J. Geol. Soc. Amer., Spec. Paper, 375:69-88.

En la tabla No. 2.3 se presenta un resumen de los estratos volcánicos que forman parte del AMSS, así como su lugar de emisión, tipo de erupción y características de los materiales.

**TABLA No. 2.3** Resumen de los estratos volcánicos que forman parte del AMSS

<b>ESTRATO O DEPÓSITO</b>	<b>LUGAR DE EMISIÓN</b>	<b>TIPO DE ERUPCIÓN</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES</b>
<b>ASS (Andesita de San Salvador)</b>	Volcán de San Salvador.	Colada de lava	Andesita, andesítico basáltico hasta dacita.
<b>Arce</b>	Caldera de Coatepeque	Erupción explosiva (corresponde a la mayor explosión)	Cenizas compuestas por arenas medias a finas de pómez con biotita, tiene color beige claro amarillento.
<b>Congo</b>	Caldera de Coatepeque	Erupción explosiva	Cenizas finas, color beige claro, algo cementadas, duras y de 38 cm de espesor en el estrato.
<b>Apopa</b>	Volcán de San Salvador	Erupción estromboliana.	Lapilli escoriáceo basáltico, color gris oscuro, vesicular y suelto cuando no presenta oxidación, afloramiento de color café.
<b>TB4</b>	Caldera de Ilopango	Erupción pliniana	Capa de pómez de color blanco, capa de lapilli de pómez con gradación normal, ceniza de caída fina blanca (en base) o amarillento (en techo).
<b>G1</b>	Volcán de San Salvador	Erupción pliniana (la más grande conocida del volcán de San Salvador)	Pómez de caída vesiculados, de composición dacítico o andesíticos, grisáceo, algo suelto, con moderada presencia de líticos oxidados y angulares, en parte proximal se observan varios niveles de oleadas piroclásticas "Surge".
<b>TB3</b>	Caldera de Ilopango	Erupción pliniana	Pómez y cenizas de caída con granulometría fina, color blanco con presencia de lapilli acrecional y flujos piroclásticos
<b>TB2</b>	Caldera de Ilopango	Erupción pliniana	Caída de pómez ligeramente mayor a TB3, caracterizado por ser mal seleccionado, con abundantes minerales oscuros representados por horblenda, techo con paleosuelo de delgado espesor y color café oscuro.

<b>G2</b>	Volcán de San Salvador	Erupción pliniana	Escorias poco vesiculadas, densa, afanítica, color gris claro o gris pardo, mezclas de magmas, líticos basáltico rojizos densos, andesitas café amarillentas y líticos hidrotermalizados.
<b>IB (Ignimbrita Boquerón)</b>	Volcán de San Salvador.	Erupción pliniana	Flujos piroclásticos de color café oscuro (surges) y café claro, poco consolidado, matriz de cenizas finas medianamente consolidadas con fragmentos de escoria gris, escorias juveniles y líticos andesíticos .etc.
<b>PL (Plan de la Laguna)</b>	Plan de la Laguna	Erupción monogenética	En la base posee lapilli andesíticos, vesicular gris, superpuesto por oleadas, la parte intermedia compuesta por cenizas de caída y oleadas piroclásticas. El techo formado por lapilli acrecional.
<b>TBJ (Tierra Blanca Joven)</b>	Caldera de Ilopango	Erupción ultrapliniana (última explosión de esta caldera de gran dimensión)	Compuesta por diferentes depósitos de caída, flujo y oleadas piroclásticas, lapilli acrecional, líticos andesíticos, se encuentra clasificada en nueve unidades estratigráficas de la A hasta G incluyendo ignimbrita alfa y beta.

FUENTE: Ayala O., (2013): “Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de tierra blanca joven (TBJ), unidad G” Trabajo de graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Civil en la Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

Luego de describir la geología del AMSS, se busca conocer las propiedades geotécnicas de dichos materiales, a continuación, se presenta una breve definición de cada una de las propiedades físicas y mecánicas del suelo, que generalmente se presenten en mapas geotécnicos.

### 2.2.3 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE MATERIALES GEOLÓGICOS DEL AMSS.

El suelo es un material formado por una gran variedad de partículas sólidas, con líquidos y gases incluidos. La porción de estos componentes determina una serie de propiedades que se conocen como físicas y mecánicas, que permiten identificar las características del suelo para poder hacer un mejoramiento del mismo, dependiendo de las condiciones existentes.

El conocimiento de las características físicas o mecánicas de los suelos es fundamental ya que el ingeniero predice, con bastante aproximación, el comportamiento de los diferentes estratos bajo la acción de las cargas a las que sean sometidas. En las tablas Nos. 2.4 y 2.5 se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

TABLA No. 2.4 Propiedades físicas de los suelos

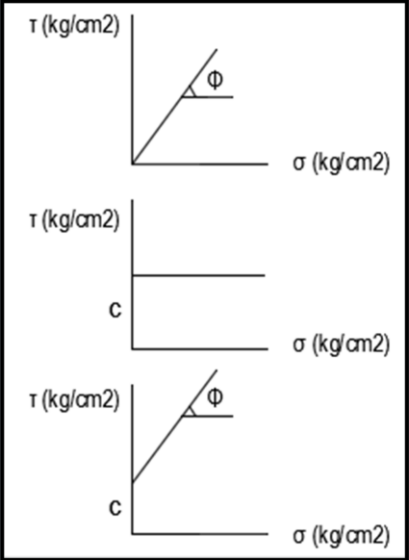
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS	
RELACIONES GRAVIMÉTRICAS	RELACIONES VOLUMÉTRICAS
<p><b>1. Contenido de humedad (<math>\omega</math>):</b> es la relación entre el peso de agua contenida en la misma y el peso de su fase sólida.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Un contenido de humedad de cero significa el suelo está completamente seco. Para un <math>\omega=100\%</math> el peso de agua en la muestra de suelo es igual al peso de los sólidos.</li> <li>Esta varía teóricamente de cero a infinito; ejemplo: Arcillas Japonesas (<math>\omega=1200-1400\%</math>), Arcillas procedentes de la región sureste de México (<math>\omega=1000\%</math>) y Valle de México (<math>\omega=500-600\%</math>).</li> </ul> $\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100$	<p><b>2. Relación de vacíos (<math>e</math>):</b> es el volumen de suelo no ocupado por partículas sólidas.</p> $e = \frac{V_v}{V_s}$ <p>La relación puede variar de 0 (<math>v_s=0</math>) a "infinito" (valor correspondiente a un espacio vacío) en la práctica no suelen encontrarse valores menores a 0.25 (arenas muy compactas con finos), ni mayores a 15 (arcillas altamente compresibles).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cuanto mayor sea la relación de vacío (<math>e&gt;1</math>) más suelto es el suelo, por lo que facilita la absorción del agua.</li> </ul>
<p><b>3. Densidad Húmeda (<math>\gamma</math>):</b> es el peso total del suelo por unidad de volumen total del suelo. Está relacionada con su grado de compactación. Ya que, para suelos compactados, su densidad es mayor.</p> $\gamma = \frac{W_t}{V_t}$	<p><b>4. Porosidad (<math>n</math>):</b> es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total del suelo.</p> $n = \frac{V_v}{V_t}$ <p>Esta relación puede variar de 0 (en un suelo ideal con solo fase solida) a 100 (espacio vacío) los valores reales suelen estar entre 25%-95%.</p>
<p><b>5. Densidad seca (<math>\gamma_d</math>):</b> es el peso del suelo excluido el agua (peso de fase solida) por unidad de volumen total del suelo.</p> $\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$	<p><b>6. Grado de saturación (<math>S</math>):</b> es el porcentaje vacíos que están ocupados por el agua.</p> $S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$ <p>Varia de 0 (suelo seco) a 100% (suelo totalmente saturado). Un suelo se considera que está saturado cuando todos sus vacíos están ocupados por el agua, de la misma manera el estado de sobresaturación significa que el suelo tiene agua libre.</p>
<p><b>7. Gravedad específica de suelo (<math>G_s</math>):</b> Se define como la relación del peso específico de la fase solida del suelo entre el peso específico de agua a 4°C destilada y sujeta a una atmosfera de presión. Esta es una propiedad intrínseca de cada tipo de suelo, y no depende del grado de compactación.</p> $G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$	

<p><b>8. Compacidad:</b> característico de suelos granulares, es el grado de compactación de los suelos no cohesivos. Es una propiedad importante en carreteras, terraplenes y todo tipo de relleno en general, al estar directamente relacionado con la consistencia y deformabilidad ya que se debe estar lo suficientemente consolidado para evitar los asentamientos. (Bañón, 2000)</p>		
<p><b>9. Consistencia:</b> es el grado de adherencia y resistencia frente a las cargas, esta es propia de los suelos arcillosos, y se mide mediante los <b>límites de Atterberg</b>.</p>		
<p>Según (Bañón, 2000) los estados de consistencia presentes en el suelo son:</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido: presencia de una cantidad excesiva de agua anula las fuerzas de atracción interparticular que mantenían unido al suelo (la cohesión) y lo convierte en una papilla, un líquido viscoso sin capacidad resistente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plástico: el suelo es fácilmente moldeable presentando grandes deformaciones con la aplicación de esfuerzos pequeños.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semisólido: el suelo deja de ser moldeable pues se quiebra y resquebraja antes de cambiar de forma.</li> </ul>
<p><b>10. Clasificación de los suelos</b></p>		
<p><u>Textura:</u> composición mineral de muestra de suelo, definida por las propiedades relativas de sus separados individuales en base a masa (arena, limo, arcilla)</p>	<p><u>Estructura:</u> es como el estado del mismo, que resulta de la granulometría de los elementos que lo componen y del modo como se hallan estos dispuestos.</p>	<p><u>Color:</u> está dado por la existencia y proporción de compuestos orgánicos y minerales.</p>

FUENTE: De los autores



TABLA No. 2.5 Propiedades mecánicas de los suelos

<b>PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS</b>		
<b>A. TEORÍA RESISTENCIA AL CORTE</b>		
Determina factores tales como la estabilidad de un talud, la capacidad de carga admisible para una cimentación y el empuje de un suelo en elementos de retención.		
En base a esta Ley de resistencia, así tenemos para diferentes tipos de suelos:		
$\tau = c + \sigma \tan \phi$		
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <p><b>Suelos puramente friccionantes</b> <math>\tau = \sigma \tan \phi</math></p> </div>	<p>Los parámetros de la resistencia cortante de un suelo son determinados en el laboratorio principalmente con dos tipos de ensayo, la prueba de corte directo (ASTM D 3080-95) y el ensayo de compresión triaxial no consolidada-no drenada (ASTM D2850-95). Se muestran valores de ángulo de fricción interna y de cohesión de materiales presentes en el AMSS. (Ver tabla No. 2.6)</p>
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <p><b>Suelos cohesivos</b> <math>\tau = c</math></p> </div>	
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <p><b>Suelos cohesivos-friccionantes</b> <math>\tau = c + \sigma \tan \phi</math></p> </div>	
<p><b>1. Ángulo de fricción interna (<math>\phi</math>):</b> Es un parámetro que proporciona una idea de la fricción entre los granos del suelo, cuando hay una tendencia al deslizamiento relativo de unos respecto a otros. Depende de la compacidad del material, forma y tamaño de los granos.</p>	<p><b>2. Cohesión(c):</b> Es la media de la cementación o atracción entre partículas de un suelo, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad.</p> <p>Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de 0,25 kg/cm<sup>2</sup> a 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula.</p>	
<p><b>Cohesión aparente (c'):</b> En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión se llama aparente y desaparece con la saturación.</p>		

FUENTE: De los autores

- **Recolección de propiedades geotécnicas de materiales geológicos presentes en el AMSS**

Para las propiedades físicas y mecánicas expresadas anteriormente, se presentan resultados de ensayos de corte directo (CD) y compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos Q(U,U), realizados en el Área Metropolitana de San Salvador por el laboratorio de suelos y materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador, con el objetivo de recolectar datos numéricos de sus propiedades tales como: clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), contenido de humedad ( $W$ ), peso volumétrico húmedo ( $\rho_h$ ), peso volumétrico seco ( $\rho_d$ ), gravedad específica ( $G_s$ ), relación de vacíos ( $e$ ), ángulo de fricción interna( $\varphi$ ) así como también su cohesión ( $C$ ) para obtener parámetros geotécnicos de referencia de la zona de interés. (Ver tabla No.2.6)

**TABLA No. 2.6** Propiedades físicas y mecánicas de los materiales presentes en el AMSS.

UBICACIÓN	TIPO DE ENSAYO	CLASIFICACIÓN	W (%)	$\rho_h$ (T/m <sup>3</sup> )	$\rho_d$ (T/m <sup>3</sup> )	G <sub>s</sub>	e	$\varphi$	C (kg/cm <sup>2</sup> )
Talud Calle a Huizucar, Prolongación Orden de Malta No II	Q (U, U)	Suelo Limo arenoso (ML) color café claro con 48% de arena y presencia de trazas de pómez.	48,20	1,44	0,97	2,48	1,56	27,8	1,15
Talud Juan Pablo II	Q (U, U)	Limo Arenoso (ML) no plástico, color gris claro con 16% de arena fina.	23,87	1,50	1,21	2,37	0,96	23,4	0,58
Talud Juan Pablo II, Tramo MetroSur	Q (U, U)	Limo arenoso (ML) no plástico color gris claro con un 30% de arena.	23,83	1,36	1,10	2,39	1,19	21,8	0,3
Boulevard Orden de Malta Tramo I	Q (U, U)	Arcilla limosa color café con 31% de arena fina a media	43,30	1,56	1,02	2,5	0,84	45	1
Construcción de muro en Quebrada La Mascota, El Rosedal, Col. Escalón	Q (U, U)	Suelo limo arenoso (ML), color gris claro, con un 45 % de arena fina, presencia de material pomítico	17,43	1,68	1,43	2,36	0,65	49	1,8
Ilopango	Q (U, U)	Arena limosa(SM) gris, 65% arena y trazas de gravillas pomítica	13,53	1,45	1,28	2,3	0,80	35	0,3

Santísima Trinidad. Polígono N°2 BLOCK A	Q (U, U)	Arena limo arcillosa de baja plasticidad, 70% de arena fina a gruesa, café y gravilla aislada	22,50	1,46	1,19	2,64	1,30	23,2	0,1
Estación km.249, línea férrea de FENDESAL	Q (U, U)	Arena limosa (SM) Café claro, 72% de arena fina y finos no plásticos	18,80	1,61	1,36	2,38	0,76	26	0,7
Carretera Tonacatepeque	Q (U, U)	Arena limosa (SM) gris claro, con trazas de grava pomítica, 18% de finos no plásticos	24,40	1,30	1,05	2,4	1,45	43	0,2
Antiguo Cuscatlán, lotes urbanización Cumbres de Esmeralda	Q (U, U)	Arena limosa (SM) 75% arena fina-media, ligeramente. Plástica, café	12,00	1,62	1,45	2,76	0,91	31	0,7
Prolongación calle San Antonio Abad y Avenida Masferrer	CD	Arena limosa (SM), gris claro, 10% finos no plásticos y trazas de pómez	20,58	1,53	1,27	-	-	39,29	0,14
Santa Tecla	CD	Limo arenoso	22,40	1,73	1,42	-	-	57,5	0,2
Ilopango, San Salvador	Q (U, U)	Arena limosa (SM), color gris claro con 54% de arena y con presencia de trazas de pómez.	18,57	1,59	1,34	2,32	0,73	39,8	0,5
Talud calle a Huizucar, prolongación Orden de Malta No. II, SS	Q (U, U)	Arcilla arenosa color café oscuro de baja plasticidad, con un 20% de arena y presencias de trazas de pómez.	29,43	1,82	1,41	2,71	0,96	23	1,1
Boulevard orden de malta tramo I	Q (U, U)	Arcilla medianamente plástica, color café oscuro, con un 12 de arena fina.	46,07	1,56	1,07	2,5	1,36	51	1

Boulevard orden de Malta y ampliación	Q (U, U)	Arcilla, café, con un 8% arena fina.	39,97	1,75	1,25	2,8	1,25	35,6	0,8
Zona Metropolitana de San Salvador	Q (U, U)	Arena arcillosa (SC) color café claro con 38% de finos poco plástico.	25,37	1,57	1,25	2,56	1,05	20,2	0,75
Zona Metropolitana de San Salvador	Q (U, U)	Arcilla arenosa (CL) color café oscuro de baja plasticidad, con un 27% de arena.	27,10	1,58	1,24	2,65	1,03	36,9	0,5
Zona Metropolitana de San Salvador	Q (U, U)	Arena Limosa SM, color café, con 49% de finos no plásticos.	25,70	1,15	0,91	2,47	1,70	44,3	0,55
María Auxiliadora, Cuscatancingo San Salvador	CD	Arena Limosa color amarillo claro, con trazas de grava pomítica y 28 % de finos no plásticos (SM).	20,17	1,57	1,30	2,71	1,08	21	0,25
Centro Escolar Las Margaritas San Salvador	Q (U, U)	Arena limosa color gris oscura, con 55% de arena fina a media y finos no plásticos (SM).	9,33	1,77	1,62	2,48	0,53	33,2	0

FUENTE: Laboratorio de Suelos y Materiales "Ing. Miguel Ángel Guzmán Urbina" de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador

NOTA: Para estos ensayos no se conoce a que unidad litológica de TBJ pertenecen.

### **2.3 GENERALIDADES SOBRE MAPAS**

Según la Asociación Cartográfica Internacional (ACI) un mapa es una representación gráfica abstracta de la superficie de la tierra que muestra las relaciones espaciales entre las características geográficas, generaliza sus apariencias simplificándolas con fines comunicativos y aplica símbolos para facilitar su interpretación, por lo que se puede decir que un mapa es un modelo (una representación de la realidad) en la cual se toman en cuenta ciertos criterios:

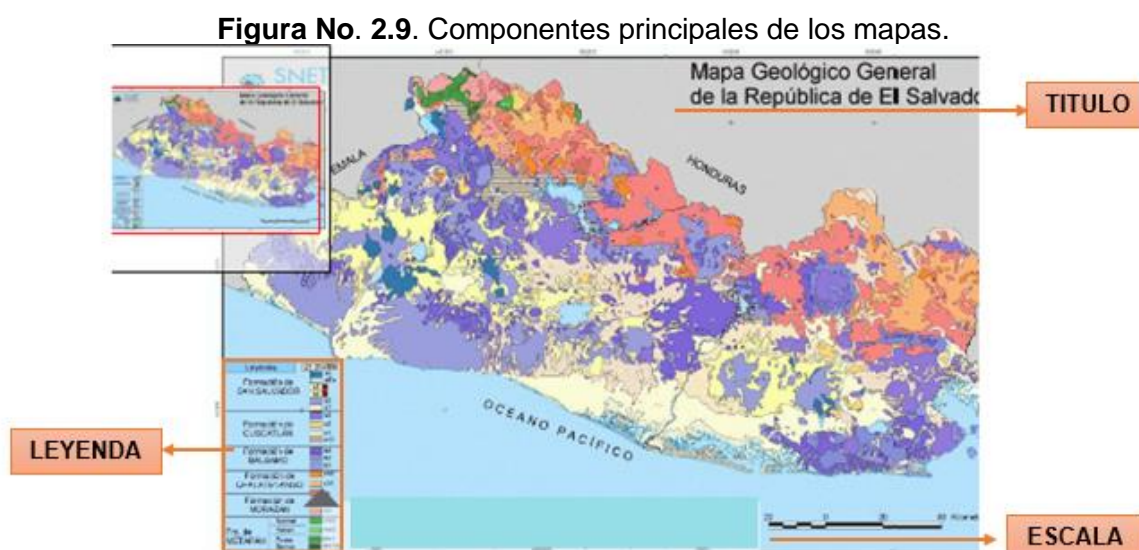
1. Hacer una selección de objetos y características a incluir.
2. Asumir un plano y un espacio que relaciona como los objetos se posicionan los unos de los otros, así como la distancia entre ellos.
3. Una región, es decir el mapa tiene límites.
4. Una escala.

Los mapas son de gran importancia porque se utilizan como modelos para representar las diversas características del planeta Tierra. Así como también constituyen un medio indispensable para la localización y la orientación, además, cumple la función de brindarle información al lector, ya que los mapas también deben de ser leídos e interpretados, como cualquier texto de índole científica.

## Componentes de los mapas

Los mapas al ser una representación gráfica, deben presentar ciertos elementos indispensables que ayuden a su interpretación. (Ver figura No. 2.9).

- La **Escala** es una relación matemática que existe entre las dimensiones reales y las del dibujo que representa la realidad sobre un plano o un mapa.
- **Leyenda** es la explicación que se provee sobre los símbolos y colores que se presentan en el mapa.
- **Título** indica claramente el contenido del mapa. Es fundamental para entender el contexto cartográfico.
- **Orientación** está establecida por la rosa de los vientos o una flecha; de esta manera, se indican los puntos cardinales.



FUENTE: De los autores.

### 2.3.1 MAPAS EN EL SALVADOR UTILIZADOS EN EL CAMPO DE LA INGENIERÍA CIVIL.

Debido a la importancia que tienen los mapas, El Salvador cuenta con diferentes tipos relacionados con la topografía, temperatura, geología, vegetación, hidrología, entre otros, debido a su amplia gama, se hará una breve descripción en aquellos que aportan información importante en la construcción de obras civiles.

En la tabla No. 2.7 se muestra una breve descripción y aplicación de los mapas en obras de ingeniería civil, así como también su respectiva escala, debido a que existen diferentes tamaños de estos, solo se presenta la escala que muestra información más precisa. En dicha tabla se hace notar que el país carece de una herramienta ingenieril muy importante como lo es un mapa de características geotécnicas, que permita conocer las propiedades físicos-mecánicas del suelo.



**TABLA No. 2.7** Descripción de Mapas de El Salvador utilizados en el campo de la Ingeniería Civil.

MAPA	ESCALA	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN
<b>Geológico</b>	1:15,000	Representación sobre un plano topográfico de los accidentes geológicos que afloran en la superficie terrestre, en el cual las formaciones geológicas y sus edades se representan mediante una trama de colores.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretar la estructura, estratigrafía, mineralogía, la paleontología y el registro histórico de la corteza de la tierra.</li> <li>• Localizar los recursos energéticos, fuentes de agua subterráneas y depósitos minerales</li> </ul>
<b>Hidrológico</b>	1:50,000	Muestra los cuerpos de agua en la superficie terrestre.	Útil a científicos, profesionales e investigadores de los campos de la hidrología, geografía, y otras ciencias naturales relacionadas con el agua, a conocer información sobre hábitats acuáticos, como estudios de vegetación, y la gestión y la planificación del agua.
<b>Topográfico</b>	1:25,000	Representan en detalle los accidentes geográficos naturales y artificiales de la superficie del suelo y curvas de nivel, siendo estos referenciados a la altura sobre el nivel del mar.	Conocer la topografía del terreno a través de sombreados, curvas de nivel normales u otros sistemas de representación gráfica. Asimismo, muestran características especiales de un área por medio de la leyenda de cada mapa en donde se indica la escala y los símbolos específicos.
<b>Geomorfológico</b>	1:25,000	Muestra las formas del relieve según su origen, las dimensiones, los tipos y sus relaciones con la estructura y su dinámica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ayudan a una mejor planificación territorial.</li> <li>• Muestran información esencial para elaborar cartografías aplicadas.</li> </ul>
<b>Mapa de zonificación sísmica</b>	1:250,000	Indica la evaluación del comportamiento dinámico del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contribuye al diseño estructural de una obra civil.</li> <li>• Ayuda a detectar zonas peligrosas ante un evento sísmico.</li> </ul>

FUENTE: De los autores.

## **2.4 MAPAS GEOTÉCNICOS.**

Gonzales de Vallejo (2002) lo define como un método en ingeniería geológica para presentar cartográficamente información geológico-geotécnica con fines de planificación y uso del territorio y para el proyecto, construcción y mantenimiento de obras de ingeniería; aportan datos sobre las características y propiedades del suelo de una determinada zona para evaluar su comportamiento y prever los problemas geológicos y geotécnicos. Su grado de complejidad depende del contenido y del detalle de la información, los cuales están en función de los siguientes aspectos:

- La escala, extensión.
- Los objetivos concretos que se persigan.
- La importancia de los diferentes factores geológico-geotécnicos y sus relaciones.
- La información disponible, datos y representatividad.

En la tabla No. 2.8 se muestra un resumen de las diferencias entre el contenido de los mapas geotécnicos y mapas geológicos.

**TABLA No. 2.8** Diferencias entre el contenido de los mapas geotécnicos vs. geológicos

MAPA GEOTÉCNICO	MAPA GEOLÓGICO
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestran una descripción y clasificación geotécnica de suelos y rocas existentes en la zona.</li> <li>• Propiedades físicas y mecánicas de los materiales.</li> <li>• Condiciones hidrogeológicas y distribución del agua.</li> <li>• Condiciones y procesos geomorfológicos.</li> <li>• Procesos dinámicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No aportan datos cuantitativos de las propiedades físicas y mecánicas, ni sobre la heterogeneidad y anisotropía de los materiales.</li> <li>• No representan los componentes del medio geológico con significado geotécnicos y su influencia en trabajos de planificación e ingeniería.</li> <li>• No representan el carácter dinámico del medio geológico en relación a la ingeniería.</li> </ul>

FUENTE: De los autores

### Clasificación de los mapas geotécnicos

Los mapas geotécnicos se realizan a escalas acordes con sus objetivos, proporcionando información geológico-geotécnica básica (por ejemplo, para planificación regional) o específica para una aplicación determinada (selección de emplazamientos, excavaciones, etc.). Los mapas se pueden clasificar en función de su objetivo, contenido y escala.

Existe una clasificación establecida por la UNESCO-IAEG (1976) en función de su objetivo y contenido, como se muestra en la tabla No. 2.9.

**TABLA No. 2.9** Clasificación de los mapas geotécnicos en función de su objetivo y contenido

CRITERIO	TIPO DE MAPA
<b>Objetivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Específico:</b> proporciona información sobre un aspecto determinado de la ingeniería geológica o para un objetivo concreto (emplazamiento de residuos, trazados de ferrocarril, condiciones del terreno para cimentación de una presa, para excavaciones subterráneas, etc.)</li> <li>• Múltiple o general: proporciona información referente a diversos aspectos de la ingeniería geológica, para variados objetivos y usos geotécnicos.</li> </ul>
<b>Contenido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temático o analítico: aporta detalles o evalúa un componente determinado del medio geológico (grado de meteorización, grado de fracturación de macizos rocosos, procesos sísmicos, expansividad de los suelos, etc.).</li> <li>• Integrado:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a) Aporta las condiciones geotécnicas descriptivas de todos los principales componentes del medio geológico.</li> <li>b) Zonificación del territorio en unidades geotécnicas homogéneas.</li> </ol> </li> <li>• Auxiliar: presenta datos concretos de algún aspecto geológico o geotécnico,</li> <li>• Complementario: proporciona información básica sobre algún aspecto geológico, geomorfológico o hidrogeológico, etc..</li> </ul>
<b>Escala</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran escala (local) : &gt;1:10,000</li> <li>• Escala media: 1:10,000 a 1:100,000</li> <li>• Pequeña escala (regional): &lt;1:100,000</li> </ul>

FUENTE: UNESCO-IAEG, (1976).

### Técnicas para la obtención de información de los mapas geotécnicos

Las características y propiedades físicas-mecánicas que contienen los mapas geotécnicos de los suelos y rocas (ver apartado 2.2.3) se evalúan a partir de medidas directas e indirectas (sondeos, ensayos, geofísica) los cuales se emplearán según el tipo, objetivo del mapa y complejidad de la zona de estudio, así como también del presupuesto y tiempo disponibles para su realización.

Previamente deben recopilarse los mapas topográficos, geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, etc. disponible, así como, la información de proyectos existente sobre la zona de trabajo (informes, proyectos, publicaciones, etc.). En la tabla No. 2.10 se muestran diferentes métodos de obtención de datos para determinar las propiedades geotécnicas.

**TABLA No. 2.10:** Metodologías para determinar características geotécnicas.

MÉTODO	DATOS
<b>Fotointerpretación y teledetección</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía de suelos, rocas, estructuras geológicas.</li> <li>• Hidrología y redes de drenaje.</li> </ul>
<b>Reconocimientos y toma de datos de campo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detalles geológicos y geomorfológicos.</li> <li>• Datos y medidas geológico-geotécnicas.</li> </ul>
<b>Métodos geofísicos</b>	Resistencia eléctrica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosidad, fracturación, saturación, salinidad.</li> <li>• Profundidad del nivel freático y sustratos rocosos.</li> </ul> Sísmica: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidad, módulos de deformación.</li> <li>• Grado y profundidad de zonas alternadas.</li> <li>• Profundidad del sustrato rocoso.</li> </ul>
<b>Sondeos, calicatas y muestreos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aportan muestras representativas.</li> <li>• Propiedades físicas y características del terreno.</li> <li>• Condiciones hidrogeológicas.</li> </ul>
<b>Ensayos in situ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades resistentes y deformaciones.</li> <li>• Tensiones naturales, Permeabilidad y presión del agua.</li> </ul>
<b>Ensayos de laboratorio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades físicas-mecánicas de los materiales</li> </ul>

FUENTE: Gonzales de Vallejo. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid. Prentice Hall

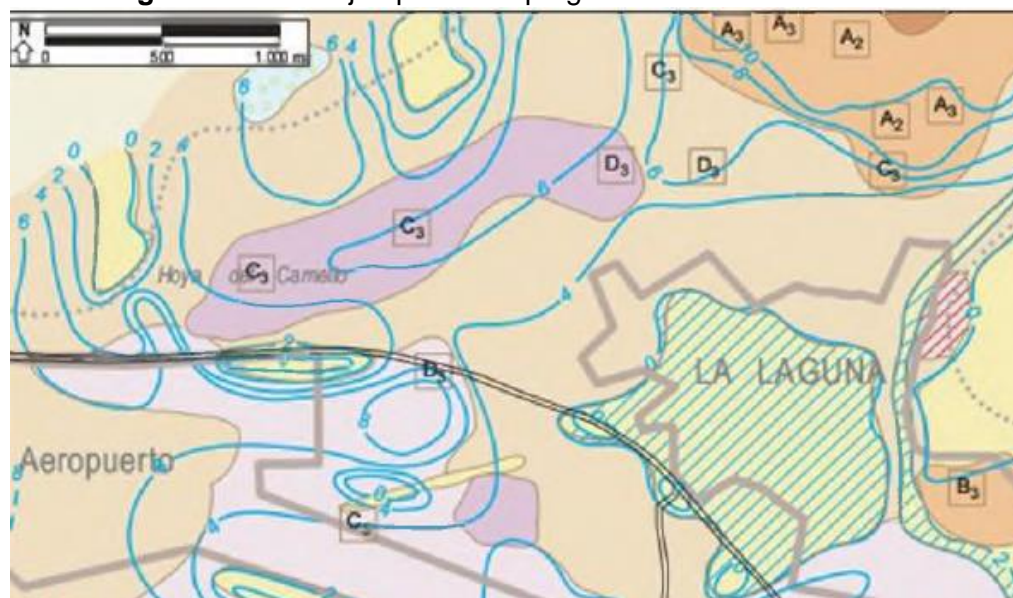
## **Representación de las propiedades físicas-mecánicas en los mapas geotécnicos**

Para la representación de la información de las características y propiedades geotécnicas de los suelos (ver apartado 2.2.3), se deben considerar los siguientes criterios:

- a) Asignando propiedades geológico-geotécnicas a los diferentes conjuntos litológicos o unidades establecidas.
- b) Delimitando las unidades homogéneas respecto de alguna propiedad (resistencia, densidad, plasticidad, grado de fracturación, grado de alteración, etc.).
- c) Zonificando en unidades geotécnicamente homogéneas y asignando valores cuantitativos.
- d) Mediante isolíneas de valores cuantitativos.

En las figuras Nos.2.10, 2.11 y 2.12 se muestran ejemplos de mapas geotécnicos para planificación urbana a escala media, donde se han establecido zonas geológico-geotécnicas en base a la litología, geomorfología y clasificación geotécnica de los materiales, definidas por colores y tramas.

Figura No. 2.10 Ejemplo de mapa geotécnico a escala media.

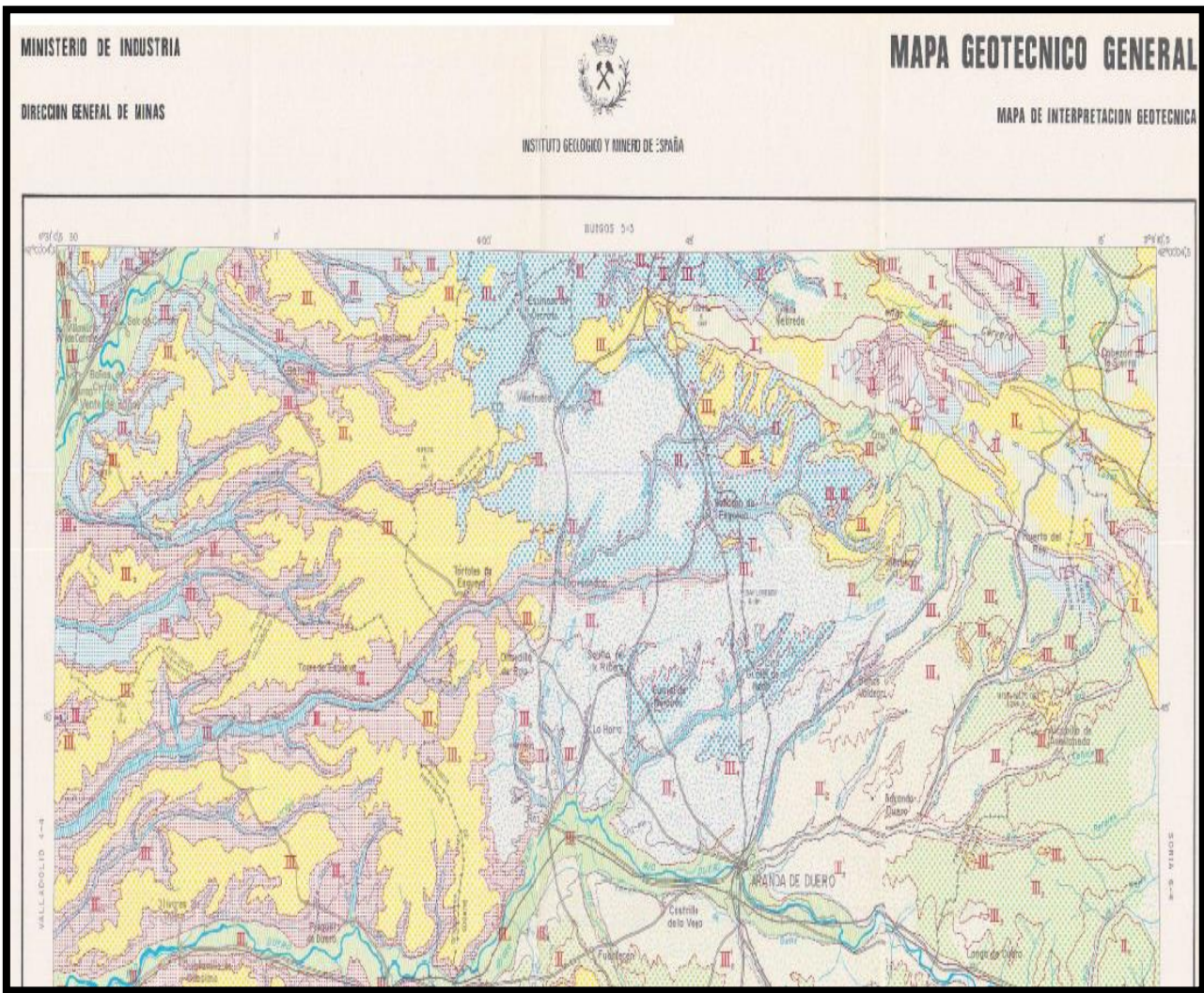


CLASIFICACIÓN GEOTÉCNICA		CARACTERÍSTICAS DE HINCHAMIENTO
ZONA	DESCRIPCIÓN	Expansividad y presiones de hinchamiento
1	Arcillas arenosas de baja plasticidad (CL), marrón oscuro y rojizas, firmes, con esporádicos cantos de basalto y lapillis	A Muy expansivo
2	Arcillas limosas de baja plasticidad (CL-ML), marrón oscuro, firmes, con gravillas de piroclastos y cantos de basalto en laderas	B Expansivo
3	Arcillas arenosas de baja plasticidad (ML), marrón rojizo, firmes	C Ligeramente expansivo
4	Arcillas limosas de alta plasticidad (MH), marrón rojizo y gris azulado, firmes a blandas, con intercalaciones de finas vetas de arenas amarillentas	D No expansivo
5	Arcillas limosas y arenosas de alta plasticidad (MH), marrón rojizo, firmes y ocasionalmente blandas, con algunas gravas	Subíndice 1 = $< 2,3 \text{ kg/cm}^2 > 1,6 \text{ kg/cm}^2$ Subíndice 2 = $< 1,6 \text{ kg/cm}^2 > 0,8 \text{ kg/cm}^2$ Subíndice 3 = $< 0,6 \text{ kg/cm}^2 > 0,2 \text{ kg/cm}^2$
6	Arcillas de alta plasticidad (CH), marrón oscuro, firmes a blandas con cantos de basalto	
7	Cantos y bloques con arenas, limos y arcillas limosas (GM, GP, GC, ML, CL) en barrancos	
		<b>LÍNEAS DE ISOPACAS</b>
		Zona de afloramientos rocosos o con recubrimientos máximos de 2 m Isopaca Equidistancia entre isopacas: 2 m

FUENTE: González de Vallejo, (1977). Mapa geotécnico general correspondiente a una zona de Tenerife (leyenda simplificada, escala original 1:25,000)



Figura No. 2.11 Ejemplo de mapa geotécnico.



**CRITERIOS DE CLASIFICACION**

CONDICIONES CONSTRUCTIVAS		PROBLEMAS "TIPO" EXISTENTES		CONCURRENCIA DE 2 PROBLEMAS "TIPO"		CONCURRENCIA DE 3 PROBLEMAS "TIPO"	
Muy favorables		Litológicos		Litológicos y Geomorfológicos		Litológicos, Geomorfológicos e Hidrológicos	
Favorables		Geomorfológicos		Litológicos e Hidrológicos		Litológicos, Geomorfológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Aceptables		Hidrológicos		Litológicos y Geotécnicos (p.d.)		Litológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Desfavorables		Geotécnicos (p.d.)		Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)		Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Muy Desfavorables							

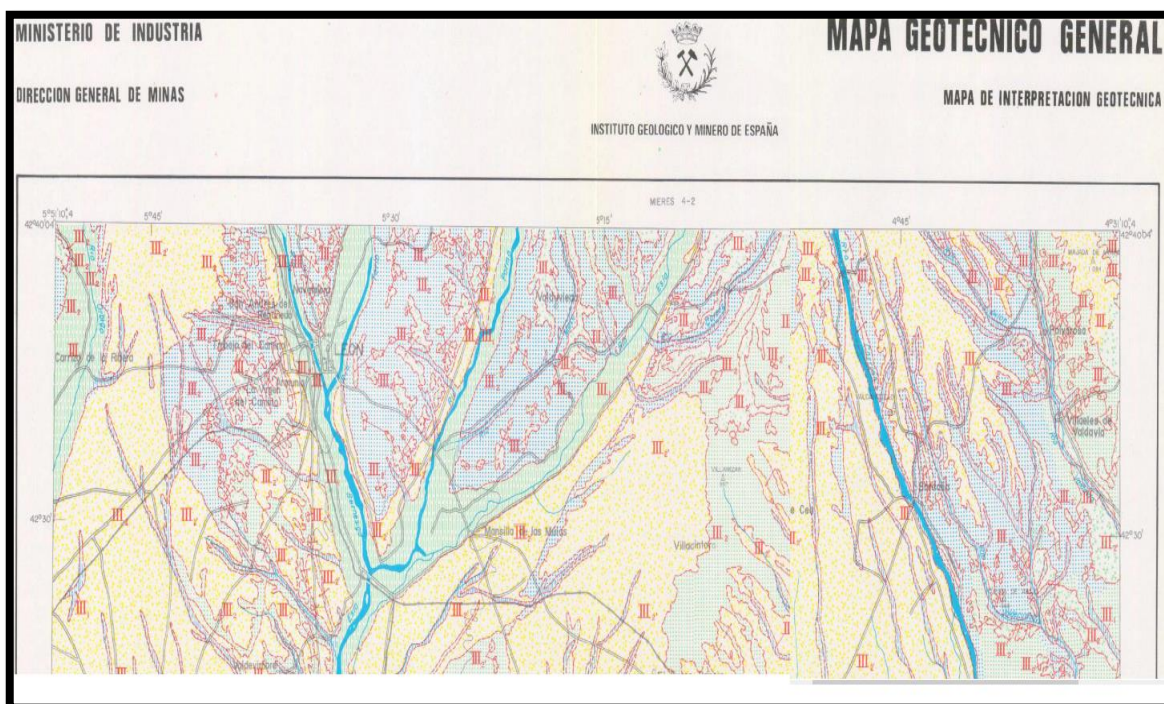
**CONDICIONES CONSTRUCTIVAS DESFAVORABLES**

	Problemas de tipo Geotécnico (p.d.)
	Problemas de tipo Geomorfológico
	Problemas de tipo Hidrológico y Geotécnico (p.d.)
	Problemas de tipo Geomorfológico y Geotécnico (p.d.)
	Problemas de tipo Litológico, Hidrológico y Geotécnico (p.d.)






















FUENTE: Mapa geotécnico general. Instituto Geológico y Minero de España.



Figura No. 2.12 Ejemplo de mapa geotécnico.



**CRITERIOS DE CLASIFICACION**

CONDICIONES CONSTRUCTIVAS		PROBLEMAS "TIPO" EXISTENTES		CONCURRENCIA DE 2 PROBLEMAS "TIPO"			CONCURRENCIA DE 3 PROBLEMAS "TIPO"		
Muy favorables		Litológicos		Litológicos y Geomorfológicos		Geomorfológicos e Hidrológicos		Litológicos, Geomorfológicos e Hidrológicos	
Favorables		Geomorfológicos		Litológicos e Hidrológicos		Geomorfológicos y Geotécnicos		Litológicos, Geomorfológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Aceptables		Hidrológicos		Litológicos y Geotécnicos (p.d.)		Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)		Litológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Desfavorables		Geotécnicos (p.d.)		Litológicos y Geomorfológicos		Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)		Geomorfológicos, Hidrológicos y Geotécnicos (p.d.)	
Muy Desfavorables									

FUENTE: Mapa geotécnico general. Instituto Geológico y Minero de España.



## **SEGUNDA ETAPA**

En la siguiente sección se describe la segunda etapa de la investigación, que consiste en establecer los requerimientos mínimos que deben tener los estudios de suelos, por lo que se define que es una campaña geotécnica, sus objetivos y sus fases para el planeamiento de un programa de exploración del subsuelo.

### **2.5 CAMPAÑA GEOTÉCNICA**

La campaña geotécnica comprende las actividades siguientes: reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo, de tal forma que se garantice un comportamiento adecuado de las estructuras (superestructura y subestructura), que preserve la vida humana, así como también evite la afectación o daño a construcciones vecinas.

#### **Objetivos de la campaña geotécnica**

Los principales objetivos que se buscan al planificar una campaña de este tipo se tienen los siguientes:

- Determinar la profundidad, espesor y características geotécnicas de los diferentes estratos del subsuelo.
- Identificar la profundidad de la roca si existe y sus características.
- Definir la tipología y dimensiones de la obra, de tal forma que las cargas generadas por excavaciones y rellenos, o las cargas soportadas por estructuras de contención, no produzcan situaciones de inestabilidad o movimiento excesivos de las propias estructuras o del terreno.

- Definición de los elementos de cimentación.
- Determinar la profundidad del nivel freático.
- Prevenir problemas relacionados con el agua tales como: filtraciones, arrastres y erosiones internas.
- Determinar la adecuada forma de ejecutar las excavaciones, así como su volumen, localización y tipo de materiales que han de ser excavados, el método y maquinaria adecuada según el tipo de suelo para llevar a cabo dicha excavación.

### **Planeamiento de un programa de exploración del subsuelo**

Para el planeamiento de un programa de exploración del subsuelo es necesario el tipo de obra a construir, dicho programa incluye algunas o la totalidad de las siguientes fases:

- A. Recopilación y análisis de la información disponible
- B. Reconocimiento del lugar
- C. Investigación exploratoria o preliminar
- D. Investigación detallada o definitiva

#### **A. Recopilación de la información disponible**

Se presenta en la tabla No. 2.11 la recopilación de información disponible necesaria para la realización de la campaña geotécnica.

TABLA No. 2.11 Recopilación de información disponible.

<b>1. INFORMACIÓN GEOLÓGICA, TOPOGRÁFICA DE SUELOS EXISTENTES Y OTROS PARA SER UTILIZADA EN EL RECONOCIMIENTO.</b>	
<b>MAPA GEOLÓGICO</b>	<p>Conocer e interpretar la estructura, estratigrafía, mineralogía, la paleontología y el registro histórico de la corteza de la tierra en el área de estudio. Muestra la disposición sobre la superficie del terreno en los diferentes tipos de rocas o formaciones geológicas, agrupadas por sus características litológicas y edades, se representan mediante una trama de colores que las identifican.</p> <p>Identificar los posibles peligros geológicos como deslizamientos de tierra.</p>
<b>MAPA TOPOGRÁFICO</b>	<p>Identificar la topografía del terreno a través curvas de nivel normales u otros sistemas de representación gráfica. Identificación de quebradas, partes altas y bajas del proyecto.</p>
<b>MAPA HIDROLÓGICO</b>	<p>Conocer información sobre hábitats acuáticos, como estudios de vegetación, y la gestión y la planificación del agua. Así como también permite conocer la profundidad del nivel freático y ubicación de los pozos. En cuanto a la estabilidad de taludes, cortes en carretera, cimentaciones y obras subterráneas, es necesario conocer el comportamiento de las aguas subterráneas porque pueden suceder fenómenos de geodinámica, alteración y deformación de los materiales.</p>
<b>MAPA SISMICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nos permite identificar zonas donde existe presencias de fallas geológicas, así como también conocer la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida el área en estudio en un determinado lapso de tiempo.</li> <li>• Conocer el relieve del terreno.</li> <li>• Identificar zonas susceptibles al deslizamiento.</li> </ul>
<b>MAPA GEOMORFOLÓGICO</b>	<p>Se puede inferir como puede ser afectado el relieve de la obra en el futuro ya que muestra las formas de éste según su origen y la dinámica de procesos actuales, siendo transformado por los fenómenos de erosión, movimientos de ladera y depósitos en los barrancos, los meandros y los conos aluviales.</p> <p>En vista que los movimientos de ladera en el AMSS son numerosos, se recomienda evaluar siempre cada lugar de construcción potencial y verificar si está ubicado en zona vulnerable debido a la posibilidad de que origine movimiento de ladera, esta evaluación especial tiene que ser realizada por especialistas en geotecnia.</p> <p>Los movimientos de laderas más peligrosos en el AMSS son los flujos de escombros enormes, por ejemplo, la ladera de El Picacho la cual es bastante inclinada, da origen durante las lluvias fuertes a flujos de escombros que llegan hasta el pie de la ladera, donde se acumulan los productos transportados como otra capa en los conos aluviales.</p>

<p><b>FOTOGRAFÍAS AÉREAS</b></p>	<p>Permite tener un reconocimiento general del campo para familiarizarse con el área de estudio, así como también observar cortes naturales, existencia y tipología de la cobertura vegetal, potenciales deslizamientos, etc. Actualmente el uso de Drones profesionales es idóneo para el estudio y visualización de todo tipo de terrenos. Se consigue a partir del conjunto de fotografías aéreas de una zona concreta a una altura determinada. Después del post-procesado, con una corrección geométrica de las imágenes, se obtiene una proyección ortogonal (sin distorsiones) de alta resolución.</p>				
<p><b>MAPAS DE USO DE SUELOS</b></p>	<p>Esta información ayuda a identificar algunos problemas potenciales que pudieran surgir durante la fase de investigación, por ejemplo, si la zona de estudio es de interés agrícola, y dependiendo del tipo de cultivo para el cual es utilizada, se puede tener alguna idea del tipo o características de materiales predominantes en la zona, o si existen sistemas de riego superficiales o tuberías de drenaje, o elementos de almacenamiento de agua subterránea, entre otras estructuras.</p>				
<p><b>REGISTROS DE CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS CERCANAS A LA ZONA DE ESTUDIO</b></p>	<p>Con esta información, el geotecnista tendría la posibilidad de conocer qué condiciones de cimentación particulares pudieran esperarse del subsuelo, y pueden ayudar a preparar cualquier contingencia que deba ser implementada durante las fases de exploraciones geotécnicas.</p>				
<p><b>2. CÓDIGOS Y ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCIÓN</b></p>					
<p><b>NORMA TÉCNICA SALVADOREÑA PARA CIMENTACIONES Y ESTABILIDAD DE TALUDES</b></p>	<p>Establece algunos lineamientos para la realización de la campaña geotécnica, cabe destacar que son necesarios otros códigos internacionales, ya que esta deja la mayor parte de dichos lineamientos a criterio del geotecnista. La norma presenta requisitos mínimos de las perforaciones que se deben cumplir, como los son el número, espaciamientos y profundidades.</p> <p>Así como también los ensayos y la información mínima que debe contener un reporte geotécnico y todos los ensayos adicionales que se requiera según el criterio del geotecnista y diseñador estructural, en el apartado 2.4.1 se profundiza más a detalle esta sección.</p> <p><b>ESTABILIDAD DE TALUDES</b></p> <p>En el capítulo cuatro de la normativa se definen los criterios básicos para el análisis, diseño y medidas de protección de taludes</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Se debe contar con un estudio geotécnico, en el cual se consideran todas las superficies de falla probables y la localización del nivel freático.</li> <li>2. Extensión de la zona a ser considerada en el estudio, se definirá según la importancia y condiciones del lugar, definido por el especialista de suelos.</li> <li>3. Medidas eficientes para drenar las aguas superficiales.</li> <li>4. La fuerza sísmica, <math>F_s</math>, se determinará multiplicado el peso de cada cuña deslizante por el coeficiente sísmico correspondiente.</li> </ol> <table border="1" data-bbox="548 1444 1477 1549"> <tr> <td>Coeficiente sísmico horizontal (<math>K_H</math>)</td> <td>0.16 (zona I) 0.12 (zona II)</td> </tr> <tr> <td>Coeficiente sísmico vertical (<math>K_v</math>)</td> <td>0 (ambas zonas)</td> </tr> </table> <p><b>Nota:</b>  <math>F_g</math>: Fuerzas gravitacionales  <math>F_s</math>: Fuerzas sísmicas.  <math>F_f</math>: fuerzas debidas a filtración.  <math>FS</math>: Factor de seguridad.</p>	Coeficiente sísmico horizontal ( $K_H$ )	0.16 (zona I) 0.12 (zona II)	Coeficiente sísmico vertical ( $K_v$ )	0 (ambas zonas)
Coeficiente sísmico horizontal ( $K_H$ )	0.16 (zona I) 0.12 (zona II)				
Coeficiente sísmico vertical ( $K_v$ )	0 (ambas zonas)				

### 3. INFORMACIÓN PRELIMINAR DE DISEÑO.

- Tipo de estructura, dimensiones y cargas de diseño.
- Dimensiones en planta y elevación del edificio, así como la profundidad de los sótanos.
- Disposición aproximada de columnas, muros portantes, y su modulación.
- Magnitud de las cargas de columnas y muros.
- Tipo de estructura (por ejemplo, simplemente apoyada de una sola luz, continua o aporticada, arcos, cascaras, fundaciones para maquinaria de precisión, etc.)
- Consideraciones arquitectónicas especiales (por ejemplo, fachadas o elementos sensibles a los asentamientos diferenciales, etc.)
- Cargas horizontales y verticales sobre columnas y estribos.
- Uso de la edificación.

FUENTE: De los autores

#### **B. Reconocimiento**

En esta fase se trata de obtener información preliminar relativa a las características del suelo, por medio de un examen minucioso del sitio y sus alrededores, así como del estudio de las diferentes fuentes de información disponible, para determinar la naturaleza del depósito y estimar las condiciones del suelo.

TOPOGRAFÍA GENERAL DEL SITIO	TIPOS DE CONSTRUCCIONES VECINAS	GEOLOGÍA PRELIMINAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observar si existe erosión.</li> <li>• La posible existencia de canales de drenaje.</li> <li>• Identificar tiraderos de basura abandonados y otros materiales presentes en el sitio</li> <li>• Existencia de grietas de contracción en el suelo, ya que esto indicaría suelos expansivos.</li> <li>• Evidencia de deslizamientos de taludes.</li> <li>• Observar si existen quebradas cercanas.</li> <li>• Revisar la información de la topografía del sitio y compararla con los planos del diseño preliminar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existencia de grietas en las paredes por asentamientos y deformaciones reflejado posiblemente en puertas y ventanas desajustadas.</li> <li>• Huellas de niveles altos de agua en edificios y estribos de puentes cercanos.</li> <li>• Observar pozos cercanos para poder determinar los niveles del agua freática.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En caso de tener cortes profundos, como los hechos en la construcción de caminos y ferrocarriles cercanos observar la estratificación del suelo, color, espesor de estratos.</li> <li>• Identificar el tipo de vegetación, el cual puede indicar la naturaleza del suelo.</li> <li>• Observar si existen afloramientos rocosos o zonas de grava y cantos rodados, los cuales pueden indicar la presencia de mantos rocosos o de otras formaciones geológicas resistentes.</li> <li>• Observar si existen taludes cercanos, verificar si estos presentan rasgos que puedan ocasionar problemas de inestabilidad o si existen flujos de agua en la zona que pudieran generar la erosión de la superficie expuesta de los taludes.</li> </ul>

Un ingeniero siempre debe hacer una inspección visual del sitio para obtener información, para esto debe de realizar las siguientes actividades:

La investigación en la fase de reconocimiento sirve para establecer las condiciones probables del suelo en el sitio; ocasionalmente, podría llevar a abandonar dicho reconocimiento sin estudios adicionales, si aquel se presenta inadecuado para la estructura.

Con todo lo anterior se deben tener suficientes criterios para poder planificar la campaña para definir: el número de sondeo, espaciamiento y profundidad.

### **C. Investigación exploratoria**

La fase de investigación del programa de exploración consiste en efectuar sondeos de prueba y recolectar muestras del suelo a intervalos deseados para su observación subsiguiente y pruebas de laboratorio. Una programación cuidadosa de ella permite obtener información específica y confiable con la menor cantidad posible de recursos, con el objetivo principal de obtener información precisa referente a las condiciones reales del suelo en el sitio.

La principal dificultad en esta programación radica en determinar el número, espaciamiento, y profundidad de las perforaciones.

- **Número de sondeos**

El número de perforaciones debe ser el apropiado para proporcionar una determinación razonable de la existencia de zonas críticas de suelo, espesor y la profundidad del estrato o estratos portantes previstos, y para localizar todos los posibles puntos blandos en el suelo de soporte que pudieran afectar en forma adversa la seguridad y el comportamiento del diseño propuesto.

- **Ubicación y número de sondeos.**

Para la ubicación de sondeos en una campaña geotécnica es recomendable remitirse a las normativas geotécnicas nacionales e internacionales ya que se presentan los criterios necesarios para esta tarea. Generalmente la ubicación de los sondeos dependerá de las concentraciones de carga de la superestructura en el terreno, ya que a mayor concentración de carga es

necesario ubicar los sondeos más próximos, con el objetivo de obtener información geotécnica precisa de las condiciones de terreno en la zona donde se proyectan mayores cargas.

Según Sowers & Sowers (1986) el espaciamiento debe ser menor en las áreas más críticas, en la tabla No.2.12. Nos muestra el espaciamiento dependiendo del tipo de estructura u obra.

**TABLA No. 2.12** Espaciamientos de los sondeos.

<b>Estructura u obra</b>	<b>Espaciamiento, m.</b>
Carretera (investigación de la subrasante)	300-600
Presa de tierra, diques	30-60
Excavación para préstamo	30-120
Edificio de varios pisos	15-30
Edificio industrial de un piso	30-90

FUENTE: Sowers & Sowers. (1986). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.

Cuando las condiciones del suelo son regulares y uniformes, los espaciamientos indicados se pueden duplicar y si son irregulares se reducen a la mitad.

- **Profundidad de exploración.**

En el caso más frecuente, la profundidad dada a la perforación debe cumplir el objetivo de suministrar información sobre aquellas características que permiten llevar a cabo las predicciones de asentamientos, y que comprende todos los estratos que puedan consolidarse o comprimirse bajo las cargas de la estructura.

Sowers & Sowers (1986) muestra en la tabla No. 2.13 Las profundidades típicas para sondeos de exploración orientadas a edificaciones.



**Tabla No. 2.13** Profundidad para sondeos de exploración

Ancho del edificio, m	Profundidad del sondeo, m Número de pisos				
	1	2	4	8	16
30	3.5	6.0	10.0	16.0	24.0
60	4.0	6.5	12.5	21.0	33.0
120	4.0	7.0	13.5	25.0	41.0

FUENTE: Sowers & Sowers. (1986). Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.

En el proyecto del Reglamento de las Construcciones, elaborado por el DUA (Dirección General de urbanismo y arquitectura del MOP), establece el número y clase de perforaciones de acuerdo a la siguiente tabla No.2.14:

**TABLA No. 2.14** Requerimiento de número de Sondeos:

Descripción del edificio	Tipo de sondeo	Numero de Sondeos
Construcciones cuya carga total media sea igual o menor que 0.2 kg/cm <sup>2</sup>	a)	Tres por cada 250.0 m <sup>2</sup> o fracción si la superficie cargada es menor o igual que 1000 m <sup>2</sup> ; tres adicionales por cada 500.0 m <sup>2</sup> o fracción cuando la superficie exceda de 1000.0 m <sup>2</sup>
Toda construcción cuya carga total media este comprendida entre 0.2 y 1.0 kg/cm <sup>2</sup> y la distribución de dicha carga especificada sea aproximadamente uniforme	b)	Dos por cada 500.0 m <sup>2</sup> o fracción si la superficie cargada es menor que 2000 m <sup>2</sup> ; dos adicionales por cada 1000 m <sup>2</sup> , cuando dicha superficie exceda de 2000 m <sup>2</sup> .
Construcciones cuya carga total media sea mayor de 1.0 kg/cm <sup>2</sup>	c)	Dos por cada 500.0 m <sup>2</sup> o fracción si la superficie cargada es menor o igual que 2000.0 m <sup>2</sup> ; dos adicionales por cada 1000.0 m <sup>2</sup> , cuando dicha superficie exceda de 2000.0 m <sup>2</sup>

FUENTE: Dirección General de urbanismo y arquitectura del MOP. Reglamento de las Construcciones

Se entiende por tipo de sondeo: a) una perforación a cielo abierto, con pala posteadora o penetrómetros manuales con una profundidad variable desde un mínimo de 1.5 m bajo el nivel probable de cimentación y usado en las construcciones más livianas; b) penetración normal, con una profundidad mínima de 20 metros bajo el nivel probable de fundación; c) perforación de muestreo inalterado (a máquina o a cielo abierto). A pesar de las definiciones anteriores y aplicación que da a estos métodos, su uso está condicionado a las circunstancias

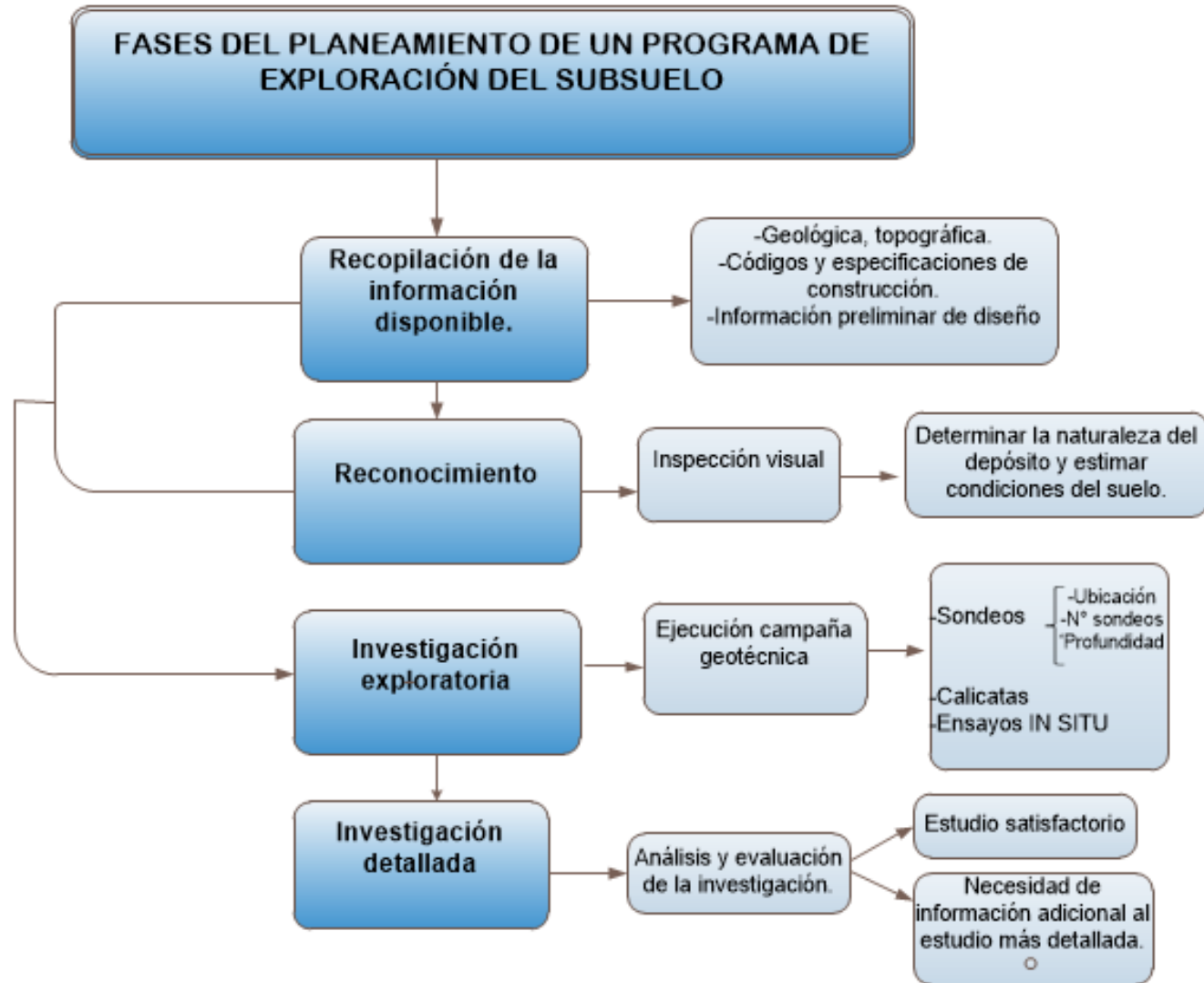
que se presenten en el lugar de la obra, así como también la profundidad de las perforaciones que como se ha explicado anteriormente, no se puede establecer de antemano, sino que es producto de las condiciones y clases de materiales que se encuentren en el subsuelo y la clase de la obra a construirse.

#### **D. Investigación detallada o definitiva**

Como consecuencia del análisis y de la evaluación de parte o de la totalidad de los resultados de la investigación realizada en la fase anterior, se llega al punto de decidir si los estudios realizados u obtenidos en la investigación exploratoria son suficientes o si es necesario conseguir información adicional más detallada. Esta decisión debe basarse en consideraciones relativas a la complejidad de las condiciones del suelo, la importancia del proyecto y su disposición de fundaciones.

En la figura No.2.13 se muestra un esquema resumen de cada una de las etapas que contiene la campaña geotécnica, las cuales fueron descritas anteriormente.

**Figura No. 2.13** Esquema de fases del programa de exploración del subsuelo.



FUENTE: De los autores

Luego de definir las actividades que comprende la campaña geotécnica, se revisan los lineamientos de las normativas geotécnicas nacionales e internacionales para la planificación de dicha campaña. Debido a que la Normativa de nuestro país (Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes, 1997) presenta deficiencias con respecto a los lineamientos requeridos para planificar una campaña geotécnica (número, espaciamiento y profundidad de sondeos), se incluye en la investigación las normativas geotécnicas de otros países como: Costa Rica, Ecuador, Chile, España, Guatemala y Colombia, con el objetivo de conocer los criterios que estos países toman en cuenta para la planificación de la campaña geotécnica, dichas normas se basan generalmente en consideraciones relativas a la complejidad de las condiciones del suelo y la importancia del proyecto.

## **2.6 LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS GEOTÉCNICAS NACIONALES E INTERNACIONALES.**

### **2.6.1 NORMA TÉCNICA SALVADOREÑA (1997)**

El método de exploración del subsuelo utilizado en el país es el ensayo de penetración estándar, en la tabla No.2.15 se presentan los requisitos de las perforaciones que se deben cumplir, cabe destacar que el especialista de suelos podrá decidir aumentar dichos requisitos dependiendo de las condiciones reales de suelo detectadas durante el proceso de perforación.

**TABLA No. 2.15** Requisitos mínimos de las perforaciones

<b>NÚMERO Y ESPACIAMIENTO DE LAS PERFORACIONES.</b>	<b>PROFUNDIDAD DE LAS PERFORACIONES</b>
Serán determinados por el diseñador estructural en conjunto con el ingeniero geotecnista, conforme a las características propias del lugar y las cargas transmitidas por la estructura del suelo.	La profundidad mínima de las perforaciones, consideradas a partir de los niveles proyectados de terrazas, será la que se indica a continuación:
	a) Para edificaciones de una planta, 3.0m
	b) Para edificaciones de dos plantas, 5.0m
	c) Para cargas que se transmiten directamente en roca, la mínima profundidad del sondeo dentro de la roca intacta será de 3.0 m.

FUENTE: Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA) & Ministerio de Obras Públicas. (1997). Normativa Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes

De la misma manera la Normativa salvadoreña determina que los esfuerzos permisibles y capacidad de carga, se pueden estimar tanto para cimentaciones superficiales o profundas a partir de la información obtenida de ensayos triaxiales, ensayos de penetración estándar u otro método aceptado de exploración.












- Para suelos granulares el esfuerzo admisible del suelo se podrá basar en correlaciones con ensayos de penetración estándar.
- El esfuerzo admisible del suelo, a partir de ensayos triaxiales, se puede determinar dividiendo la capacidad de carga ultima entre un factor de reducción de tres.
- La capacidad de carga admisible de un pilote de punta o fricción, se determinará dividiendo la capacidad de carga ultima entre un factor de reducción de tres. Así como también la establece la información mínima que debe contener un reporte geotécnico:

- Capacidad de carga admisible.
- Identificación y clasificación del suelo.
- Condiciones de humedad. Y límites de consistencia.
- Presencia de agentes contaminantes y flujos de aguas subterráneos.
- Definición de profundidad mínima de desplante de las cimentaciones.
- Para estructuras clasificadas como Categoría de Ocupación I\*, además deberá considerarse en el reporte la identificación y ubicación de fallas geológicas. Así como todos los ensayos adicionales que a criterio del geotecnista y diseñador estructural, que se requieran.

\*Según la Norma técnica para diseño por sismo (1997), se clasifica categoría ocupación I, a las edificaciones que son indispensables después de un sismo, para atender la emergencia, preservar la salud y la seguridad de las personas. Incluye hospitales, centros de salud, estaciones de bombero, centrales telefónicas y de telecomunicaciones, instalaciones escolares y militares y cualquier otra edificación y/o instalación de servicio público.

En la tabla No. 2.16 presenta un resumen de las normativas internacionales a estudiar, mostrando los criterios que cada uno de los países toman en cuenta para determinar los requisitos mínimos de la campaña geotécnica (número, profundidad y espaciamiento máximo de sondeo).

TABLA No. 2.16 Cuadro resumen de normativas internacionales.

COSTA RICA (2001)	ECUADOR (2014)	CHILE (2014)
<p>— Complejidad geotécnica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja</li> <li>• Media</li> <li>• Alta </li> </ul> <p>— Magnitud de la obra (tabla No.2.17)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja</li> <li>• Media</li> <li>• Alta</li> </ul> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Profundidad, espaciamento y número de sondeos mínimos. (tabla No.2.18)</div>	<p>— <b>Clasificación de las unidades de construcción por categorías.</b> (tabla No.2.19)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja</li> <li>• Media</li> <li>• Alta</li> </ul> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Profundidad y número de sondeos. (tabla No.2.20)</div> <p>Determina la profundidad mínima de los sondeos de acuerdo al tipo de cimentación. (tabla No.2.21)</p>	<p>— <b>Área del lote y profundidades.</b> (tabla No.2.22 y No. 2.23)</p> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Número mínimo de sondeos</div>
ESPAÑA	GUATEMALA (2010)	COLOMBIA (1998)
<p>— <b>Tipo de construcción.</b> (tabla No.2.24)</p> <p style="text-align: center;"></p> <p>— <b>Grupo de terreno.</b> (tabla No.2.25)</p> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Distancias máximas entre puntos de reconocimiento y profundidades orientativas. (tabla No.2.26)</div>	<p>— <b>Clasificación de obra para niveles de sismicidad.</b> (tabla No.2.27)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li style="width: 50%;">-Crítica</li> <li style="width: 50%;">-Escencial</li> <li style="width: 50%;">-Importante</li> <li style="width: 50%;">-Ordinaria</li> <li style="width: 50%;">-</li> <li style="width: 50%;">Utilitaria.</li> </ul> <p style="text-align: center;"></p> <p>— <b>Nivel de protección sísmica.</b> (tabla No.2.28)</p> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Número mínimo de sondeos y profundidades de exploración. (tabla No.2.29)</div>	<p>— <b>Categoría de Edificación</b> (tabla No.2.30)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normal, Intermedia</li> <li>• Alta y Especial </li> </ul> <p>— <b>Variabilidad del suelo.</b> (tabla No.2.31)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja, Media y Alta </li> </ul> <p>— <b>Grado de complejidad de la obra</b> (tabla No.2.32)</p> <p style="text-align: center;"></p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Número mínimo de perforaciones y profundidad. (tabla No.2.33)</div>

FUENTE: De los autores

## 2.6.2 NORMA TÉCNICA DE COSTA RICA (2001)

Esta normativa plantea que el número de perforaciones, profundidad y espaciamiento, depende tanto de las condiciones de sitio, como de las características de la obra y establece como guía la tabla No. 2.17 para los requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio.

**TABLA No. 2.17** Requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio

COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA MAGNITUD DE LA OBRA	BAJA	MEDIA	ALTA
<b>BAJA</b>	N mín.: 2 E Max.: 60m Pmin: D <sub>f</sub> +2m	N mín.: 3 E máx.: 40m Pmin: D <sub>f</sub> +3m	N mín.: 4 E máx.: 30m Pmin: D <sub>f</sub> +4m
<b>MEDIA</b>	N mín.: 2 E máx.: 50m Pmin: D <sub>f</sub> +3m	N mín.: 3 E máx.: 35m Pmin: D <sub>f</sub> +3m	N mín.: 4 E máx.: 25m Pmin: D <sub>f</sub> +4m
<b>ALTA</b>	N mín.: 2 E máx.: 40m Pmin: D <sub>f</sub> +4m	N mín.: 3 E máx.: 30m Pmin: D <sub>f</sub> +3m	N mín.: 4 E máx.: 20m Pmin: D <sub>f</sub> +5m
<b>ESPECIAL</b>	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será definida por el ingeniero geotécnico.		

FUENTE: Asociación Costarricense de Geotecnia (1994). Código de cimentaciones de Costa Rica.

N mín.: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E Max.: Espaciamiento máximo entre puntos de sondeo o de exploración.

Pmin: Profundidad mínima de los sondeos, en m.

D<sub>f</sub>: Profundidad estimada de cimentaciones, en m



## MAGNITUD DE LA OBRA

En la tabla No. 2.18 se presentan los requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio.

**TABLA No. 2.18** Requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio

<b>Baja:</b> construcciones menores de tres niveles. Incluye residencias, bodegas, canales, urbanizaciones, áreas industriales.
<b>Media:</b> edificaciones de cuatro a diez niveles o cargas menores de trescientas toneladas por apoyo.
<b>Alta:</b> edificaciones mayores de diez niveles o cargas mayores de trescientas toneladas por apoyo.
<b>Especial:</b> construcciones que, por su magnitud, complejidad estructural o de excavación, o condiciones especiales de proceso constructivo, requieren de estudios preliminares, casos especiales de fundación como losas, pilotes, cajones de cimentación, etc.

FUENTE: Asociación Costarricense de Geotecnia (2001). Código de cimentaciones de Costa Rica.

### Complejidad geotécnica

La clasificación de la complejidad geotécnica se deja a criterio del ingeniero geotecnista que esté a cargo del estudio correspondiente.

#### 2.6.3 NORMA TÉCNICA ECUATORIANA (2014)

Esta norma define las unidades de construcción y su importancia en función de la altura y cargas a transmitir de tal forma que se determine el número mínimo de sondeos, distribución y profundidad de los sondeos y perforaciones que proporcione información de la extensión, espesor, y profundidad de los estratos potencialmente portantes.

#### Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Para la clasificación de edificaciones se asignará la categoría más desfavorable que resulte de la tabla No.2.19

**TABLA No. 2.19** Clasificación de las unidades de construcción por categorías.

CLASIFICACIÓN	SEGÚN LOS NIVELES DE CONSTRUCCIÓN	SEGÚN LAS CARGAS MÁX. DE SERVICIO EN COLUMNAS (KN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801-4000
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4001-8000
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8000

FUENTE: Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2014). Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

### Número mínimo de sondeos

El número mínimo de sondeos de exploración que deberán efectuarse en el terreno donde se desarrollará el proyecto se define en la tabla No.2.20.

**TABLA No. 2.20** Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción.

CATEGORIA DE LA UNIDAD DE CONSTRUCCIÓN			
BAJA	MEDIA	ALTA	ESPECIAL
Profundidad Mínima: 6m	Profundidad Mínima: 15m	Profundidad Mínima: 25m	Profundidad Mínima: 30m
Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 5

FUENTE: Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2014). Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

### Profundidad de los sondeos

**TABLA No. 2.21** Profundidad mínima de los sondeos de acuerdo al tipo de cimentación.

TIPO DE LA OBRA CIVIL SUBTERRANEA	PROFUNDIDAD DE LOS SONDEOS
Losa corrida	1.5 veces el ancho
Zapata	2.5 veces el ancho de la zapata de mayor dimensión.
Pilotes	Longitud total del pilote más largo más 4 veces el diámetro del pilote.
Grupo de pilotes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud total del pilote más largo, más 2 veces el ancho del grupo de pilotes.</li> <li>• 2.5 veces el ancho del cabezal de mayor dimensión.</li> </ul>
Excavaciones	Mínimo 1.5 veces la profundidad de excavación a menos que el criterio del ingeniero geotécnico señale una profundidad mayor según requerimiento del tipo de suelo.
Caso particular, roca firme	<p>En los casos donde se encuentre roca firme, o aglomerados rocosos o capas de suelos firmes asimilables a rocas, a profundidades inferiores a las establecidas, el 50% de los sondeos deberán alcanzar las siguientes penetraciones en material firme, de acuerdo con la categoría de la unidad de construcción:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Categoría baja: los sondeos pueden suspenderse al llegar a estos materiales;</li> <li>• Categoría Media, penetrar un mínimo de dos metros en dichos materiales, o dos veces el diámetro de los pilotes en estos apoyados.</li> <li>• Categoría Alta y Especial, penetrar un mínimo de cuatro metros o 2.5 veces el diámetro de pilotes respectivos, siempre y cuando se verifique la continuidad de la capa o la consistencia adecuada de los materiales y su consistencia con el marco geológico local.</li> </ul>

FUENTE: Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI). (2014). Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

#### 2.6.4 NORMA TÉCNICA CHILENA (2014)

Esta norma determina el número de perforaciones según el área del lote estudiado y la profundidad de exploración.

##### **Cantidad mínima de puntos de exploración**

El número de puntos de exploración se determina según tablas No.2.22 y No.

2.23.

**TABLA No. 2.22.** Número mínimo de puntos de exploración para profundidades hasta 4.0 m.

Superficie a explorar m <sup>2</sup>	Cantidad de puntos de exploración
Hasta 500	2
De 501 a 1000	3
De 1001 a 2000	4
De 2001 a 5000	5
De 5001 a 10 000	6
De 10 001 a 20 000	8
De 20 001 a 30 000	10
Más de 30 000	Según lo indicado por el profesional competente, con un mínimo de 12.

FUENTE: Instituto Nacional de Normalización (2014). Norma Chilena Geotecnia-Estudio de la Mecánica de Suelos. NCh1508.

**TABLA No. 2.23.** Número mínimo de puntos de exploración para profundidades sobre 4 m y hasta 8 m.

Superficie a explorar m <sup>2</sup>	Cantidad de puntos de exploración
Hasta 1000	2
De 1001 a 4000	3
De 4000 a 10 000	4
Más de 10 000	Según lo indicado por el personal competente, con un mínimo de 5.

FUENTE: Instituto Nacional de Normalización (2014). Norma Chilena Geotecnia-Estudio de la Mecánica de Suelos. NCh1508.

#### 2.6.5 NORMA TÉCNICA ESPAÑOLA

Esta norma plantea que para la programación del reconocimiento del terreno se deben tener en cuenta todos los datos relevantes de lote, tanto los topográficos, urbanísticos y generales del edificio, como los datos previos de

reconocimientos y estudios del mismo lote o lotes limítrofes si existen, y los generales de la zona realizados en la fase de planeamiento o urbanización.

A efectos del reconocimiento del terreno, la unidad a considerar es el edificio o el conjunto de edificios de una misma promoción, clasificando la construcción y el terreno según las tablas Nos. 2.24 y 2.25 respectivamente.

**TABLA No. 2.24 Tipo de construcción (Incluye sótanos)**

C-0 Construcciones de menos de 4 plantas y superficie construida inferior a 300m <sup>2</sup>
C-1 Otras construcciones de menos de 4 plantas
C-2 Construcciones entre 4 y 10 plantas
C-3 Construcciones entre 11 a 20 plantas

FUENTE: Documento Básico SE-C Cimientos (2007). Norma española, Seguridad Estructural de Cimientos.

**TABLA No. 2.25 Grupo de terreno.**

T-1 Terrenos favorables: aquellos con poca variabilidad, y en los que la práctica habitual en la zona es de cimentación directa mediante elementos aislados.
T-2 Terrenos intermedios: los que presentan variabilidad, o que en la zona no siempre se recurre a la misma solución de cimentación, o en los que se puede suponer que tienen rellenos antrópicos de cierta relevancia, aunque probablemente no superen los 3,0 m.
T-3 Terrenos desfavorables: los que no pueden clasificarse en ninguno de los tipos anteriores. De forma especial se considerarán en este grupo los siguientes terrenos: a) Suelos expansivos b) Suelos colapsables c) Suelos blandos o sueltos d) Terrenos kársticos en yesos o calizas e) Terrenos variables en cuanto a composición y estado f) Rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m g) Terrenos en zonas susceptibles de sufrir deslizamientos h) Rocas volcánicas en coladas delgadas o con cavidades i) Terrenos con desnivel superior a 15° j) Suelos residuales k) Terrenos de marismas

FUENTE: Documento Básico SE-C Cimientos (2007). Norma española, Seguridad Estructural de Cimientos.

Con carácter general el mínimo de puntos a reconocer será de tres. En la tabla No. 2.26 se establecen las distancias máximas ( $d_{m\acute{a}x}$ ) entre puntos de reconocimiento que no se deben sobrepasar y las profundidades orientativas bajo el nivel final de la excavación.

**TABLA No. 2.26** Distancias máximas entre puntos de reconocimiento y profundidades orientativas

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	GRUPO DE TERRENO			
	T1		T2	
	d <sub>máx</sub> (m)	P (m)	d <sub>máx</sub> (m)	P (m)
<b>C-0, C-1</b>	35	6	30	18
<b>C-2</b>	30	12	25	25
<b>C-3</b>	25	14	20	30
<b>C-4</b>	20	16	17	35

FUENTE: Documento Básico SE-C Cimientos (2007). Norma española, Seguridad Estructural de Cimientos.

### 2.6.6 NORMA GUATEMALTECA (2010)

Esta norma establece los números mínimos de sondeo y sus profundidades (Ver tabla No. 2.27) de acuerdo al nivel de protección sísmica que tienen las edificaciones según las Normas Estructurales de Diseño para la República de Guatemala (AGIES NR-1 2000 y AGIES NR-2 2000) y que se muestran en la tabla No. 2.28 y tabla No. 2.29.

**TABLA No. 2.27.** Clasificación de obra para niveles de sismicidad.

CLASIFICACION DE LA OBRA	
<b>Critica</b>	Son aquellas que de fallar o colapsar pondrían en peligro directa o indirectamente a gran número de personas. Son ejemplo de obras críticas los componentes principales de grandes centrales enérgicas, presas de gran tamaño, grandes puentes, y otras obras similares.
<b>Esencial</b>	Son aquellas que deben permanecer operantes durante y después de un desastre o evento adverso. Pertenecen a esta categoría las obras estatales o privadas hospitales con instalaciones de emergencia, de cuidado intensivo y/o quirófanos, instalaciones de defensa civil, de bomberos, de policía y de comunicaciones asociadas con la atención de desastres.
<b>Importante</b>	Son aquéllas que albergan o pueden afectar a gran número de personas; aquéllas donde los ocupantes estén restringidos a desplazarse, aquéllas donde se prestan servicios importantes (pero no esenciales después de un desastre) a gran número de personas o entidades, obras que albergan valores culturales reconocidos o equipo de alto costo, por ejemplo edificios educativos y guarderías públicos y privados; todos los hospitales; sanatorios; centros y puestos de salud públicos y privados que no clasifiquen como esenciales.
<b>Ordinaria</b>	En esta categoría se incluyen viviendas, comercios, edificios industriales y agrícolas que por su volumen, tamaño, importancia o características no tengan que asignarse a otra clasificación.
<b>Utilitaria</b>	Aquellas obras que albergan personas de manera incidental, y que no tienen instalaciones de estar, de trabajo o habitables y obras auxiliares de infraestructura.

FUENTE: Normas estructurales de Diseño recomendadas para la República de Guatemala (2000). AGIES NR-1, Capítulo 1 (1.3 Clasificación de obra)

**TABLA No. 2.28.** Nivel de protección sísmica

INDICE DE SISMICIDAD I <sub>o</sub>	CLASIFICACION DE LA OBRA				
	Critica	Esencial	Importante	Ordinaria	Utilitaria
5	E	E	D	C2	C1
4	E	D	C2	C1	B
3	D	C2	C1	B	B
2	C2	C1	B	B	A

FUENTE: Normas estructurales de Diseño recomendadas para la República de Guatemala (2000) AGIES NR-2., Capítulo 3 (3.2.2 Nivel de protección sísmica)

**TABLA No. 2.29.** Número mínimo de sondeos y profundidades de exploración.

Nivel de protección sísmica del tipo de edificación (AGIES NR-2)	Construcción de edificaciones		Construcción de edificaciones de 1 o 2 niveles	
	Número mínimo de Sondeos	Profundidad mínima de sondeos (m)	Número mínimo de Sondeos	Profundidad mínima de sondeos (m)
A	3	15	3	6
B	4	25	4	8
C	5	30	5	10
D, E	6	30	**	**

FUENTE: Normas de seguridad estructural de edificaciones y obras de infraestructura para la república de Guatemala (2000) AGIES NSE 2.1-10 Estudios Geotécnicos y de Microzonificación

### 2.6.7 NORMA COLOMBIANA (1998)

Esta norma establece el número mínimo de sondeos y sus profundidades (ver tabla No 2.33) en base a la complejidad del proyecto (ver tabla No 2.32), que a su vez es definida por la categoría de la edificación mostrada en la tabla No. 2.30 y la variabilidad del suelo (ver tabla No 2.31)

Categoría de la edificación: Se clasifica como normal, intermedia, alta y especial, en dos grandes grupos-edificios y casas- según el área de lote implicado, la altura de edificación y el número de repeticiones. Variabilidad de suelo: se clasifica en baja, media y alta como se muestra en tabla No.2.30.

**TABLA No. 2.30.** Categoría de Edificación

Categoría de Edificación	Edificios		Casas	
	Lote m <sup>2</sup>	No. Pisos	Lote Proyecto m <sup>2</sup>	No. de Unidades
Normal	100 a 250	<4	<1000	0-10
Intermedia	250 a 1000	4-7	1000-1500	10-100
Alta	1000 a 1500	8-14	5000-10000	100-500
Especial	>1500	>15	>10000	>500

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente (NSR-98) Título H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

Grados de complejidad: Se definen los grados de complejidad como I, II, III y IV mediante la matriz de calificación, donde por una parte se compara la categoría de edificación y la variabilidad del suelo por la otra como se muestra en la tabla No.2.32.

**TABLA No. 2.31.** Variabilidad del Suelo**VARIABILIDAD DEL SUELO.**

**Variabilidad baja:** Subsuelos donde no existen variaciones importantes entre el lugar programado para una perforación. Originados en formaciones geológicas simples, presentan materiales de espesores y características mecánicas aproximadamente homogéneas, cubren grandes áreas con materiales uniformes tales como depósitos lacustres, llanuras aluviales, terrazas de ríos en sus cursos medio-bajo, depósitos de inundación, suelos residuales en zonas de pendiente baja y uniforme, y en general suelos con pendientes transversales de hasta 10%.

**Variabilidad media:** Situación intermedia entre variabilidad alta y baja, como terrazas y llanuras aluviales en curso medio, desembocaduras de ríos y quebradas, suelos residuales relativamente complejos, suelos con pendientes transversales desde 10%-50%, en general, los depósitos no contemplados en las anteriores.

**Variabilidad alta:** Subsuelos donde existen variaciones importantes entre una perforación y otra. Están originadas en formaciones geológicas complejas, con alternancia de capas de materiales con orígenes y espesores diferentes, como depósitos de ladera, flujo de lodos y escombros, depósitos aluviales intercalados. Se incluyen la variabilidad los terrenos sometidos a alteraciones por deslizamientos, movimientos de tierra, voladeros, depósitos de escombros, minas y canteras y suelos con pendientes superiores a 50%.

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente (NSR-98) Título H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

**TABLA No. 2.32.** Grado de complejidad de la obra

Categoría de Edificación	Variabilidad del suelo		
	Baja	Media	Alta
Normal	I	I	II
Intermedia	II	II	III
Alta	III	III	III
Especial	III	IV	IV

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente (NSR-98) Título H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

Una vez definido el grado de complejidad de la obra en base a los requisitos mencionados (Categoría de edificación y variabilidad del suelo) es posible establecer el número mínimo de sondeo y sus profundidades como se muestra en la tabla No.2.33

**TABLA No. 2.33.** Número mínimo de perforaciones y profundidad

Complejidad	Número mínimo de sondeos y profundidad de los mismos			
	Construcción de edificios	Profundidad (m)	Construcción de casas	Profundidad (m)
I	3	15	3	6
II	4	20	4	8
III	5	25	5	10
IV	6	30	6	15

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente (NSR-98) Título H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)



### **3.0 CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Este capítulo, describe la metodología de la investigación a desarrollar, para la elaboración de un mapa de características geotécnicas de un área en particular. La metodología general consistirá primeramente en definir en base a la cantidad de información disponible, el área de interés, así como también en describir los requerimientos mínimos para generar el mapa, para lo cual se elaboró una base de datos donde se presenta la información de manera ordenada, con el objetivo de poder uniformizar los parámetros geotécnicos se tomaron algunas consideraciones. Debido a la magnitud de la información disponible será necesario utilizar un software para la corrección de errores que puedan generarse durante el proceso de elaboración de la base de datos, posteriormente, se procede a generar el mapa utilizando un software que permita recopilar, organizar, administrar y analizar la información de manera gráfica, como pueden ser ArcGIS o QGIS entre otros.

## 3.2 METODOLOGÍA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La definición del área de interés, dependerá de la cantidad de información geotécnica disponible, siendo las posibles fuentes de información las siguientes:

- Entidades gubernamentales donde se desarrollen proyectos, o donde se concedan permisos ya sea de tipo ambientales o de construcción.
- Empresas que se dediquen a la ejecución de estudios de suelos.
- Ejecución de pruebas geotécnicas de campo y de laboratorio para obtener información acerca de las propiedades físicas-mecánicas del suelo de un área en particular.

Si la información recabada es proporcionada por entidades gubernamentales, se procurará que exista una cantidad suficiente y representativa, que permita identificar y caracterizar de manera adecuada los materiales presentes en una zona, tanto en superficie como en profundidad.

### 3.2.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA ELABORAR UN MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.

- **Selección de datos generales**

Se tomará en cuenta algunas generalidades como: nombre del proyecto, ubicación, fecha de realización del estudio, época del año en que se realizó el estudio, y empresa que realiza el estudio.

- **Selección de parámetros geotécnicos**

Dado el alcance del mapa que se pretende generar, se seleccionará, de los estudios geotécnicos proporcionados y/o ensayos de campo/laboratorio, los parámetros geotécnicos a representar, como se muestran en la tabla No.3.1.

**TABLA No. 3. 1** Parámetros geotécnicos que se obtendrán de estudios de suelos.

<b>PARÁMETROS GEOTÉCNICOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Resistencia a la penetración( $N_{\text{campo}}$ )	Es la resistencia del suelo a ser penetrado a partir de una cantidad de golpes a través del ensayo de penetración estándar en base a la norma ASTM D1586.
Clasificación y descripción del suelo	Clasificación del suelo en base a la norma ASTM D2487: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
Compacidad y Consistencia	Indica el grado de acomodo de las partículas del suelo, el cual se determina según el tipo de éste, ya sea friccionante o cohesivo. Sera obtenida directamente de estudios de suelos o determinada a partir de correlaciones con el valor $N_{\text{campo}}$
Peso volumétrico	Valor que se presenta en los estudios de suelos, determinado ya sea por ensayos de laboratorio o por criterio del geotecnista.
Contenido de humedad	Parámetro geotécnico presentado en los estudios de suelo en base a la norma ASTM D2216.
Angulo de fricción interna	Indica el grado de trabazón de las partículas de suelos friccionantes, el cual es determinado en los estudios de suelos por medio de ensayos triaxiales o por correlaciones de ensayos SPT.
Cohesión del suelo	Es la cementación o atracción entre las partículas de un suelo, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua, la cual es determinada en los estudios de suelos por medio de ensayos triaxiales, corte directo o por correlaciones de ensayos SPT.

FUENTE: De los autores.

- **Referencia geográfica del área de estudio**

Los estudios de suelos proporcionados deberán contener coordenadas geográficas que nos permitirán ubicar los puntos con información en el área de interés. Para la información geotécnica obtenida a través de ensayos de campo

y/o laboratorio se deberá tomar las coordenadas geográficas por medio de un GPS en el punto de estudio.

Posteriormente, con las coordenadas planas de todos los puntos de interés, se colocará la información de manera ordenada, en una hoja de cálculo Excel, la cual servirá como una base que permitirá referenciar los puntos donde se tiene la información geotécnica con la ayuda de un software de modelación de mapas.

- **Recopilación de información digital disponible.**

Para cumplir con los objetivos planteados, es necesario contar con información del área de estudio que apoye en la interpretación de los resultados, tales como:

- Mapa topográfico: Permite identificar la topografía del área de interés a través de curvas de nivel normales u otros sistemas de representación gráfica, además muestra la ubicación de las partes más altas y bajas del terreno.
- Mapa geológico: Muestra la estructura, estratigrafía y el registro histórico de la corteza de la tierra en el área de interés, por lo que nos permitirá verificar la coherencia de los resultados obtenidos, en el mapa de características geotécnicas. Por ejemplo: si el mapa geológico indica presencia de estratos basálticos, se esperaría encontrar en el mapa geotécnico un estrato resistente.
- Mapa hidrológico: Permite conocer la ubicación de los cuerpos de agua presentes en el área en estudio, donde se forman suelos de origen aluvial,

por lo que en el mapa geotécnico se esperaría la presencia de suelos sueltos.

- Mapa geomorfológico: Muestra las formas del relieve según su origen y la dinámica de procesos actuales, siendo transformado por los fenómenos de erosión, movimientos de ladera y depósitos en los barrancos, los meandros y los conos aluviales.
- Mapa de división territorial: muestra la división de los departamentos, donde se subdivide sucesivamente en cada uno de sus municipios.
- Mapa de vías terrestres: estos mapas son diagramas viales a escala y con coordenadas geográficas.

### 3.2.3 ELABORACIÓN DE BASE DE DATOS

Se procederá a ordenar de manera resumida en tablas la información obtenida en las etapas anteriores: generalidades, geotécnica, referencias geográficas, con el objetivo de crear una base de datos que servirá de fundamento para la generación de los mapas.

La base de datos deberá llevar como mínimo la siguiente información:

- Proyecto: Obra civil, se utilizará como información general de cada estudio de suelos, en caso que se proporcionen.
- Coordenadas geográficas de los puntos con información geotécnica en el área de interés.

- Fecha de realización del ensayo, con la cual se definirá la estación del año que se realizó el ensayo SPT, con el objetivo de conocer la influencia que ésta tiene en el contenido de humedad.
- Número de Sondeos, corresponde a todas las perforaciones realizadas en el estudio de suelos.
- Profundidad explorada de cada perforación realizada.
- $N_{\text{campo}}$ , correspondiente al intervalo en el que se mide la resistencia a la penetración del suelo. Suma de los golpes de los últimos 30.0 cm.
- Clasificación y descripción de suelos, la cual se obtendrá directamente de los estudios geotécnicos.
- Compacidad/Consistencia, las cuales se podrán obtener directamente de los estudios de suelos, si existe una variabilidad significativa de un laboratorio a otro en las teorías utilizadas para definir la compacidad/consistencia, estas se podrán determinar de manera teórica en base al  $N_{\text{campo}}$ .
- El Contenido de humedad, el cual se obtendrá directamente de los estudios de suelos.

#### 3.2.4 CONSIDERACIONES PARA ELABORAR LA BASE DE DATOS.

Previo a la elaboración del mapa, es necesario revisar y analizar la información disponible, ya que se prevé que existan variaciones en la forma en que presentan la información las empresas que realizan estudios de suelos, por lo

que, para uniformizar los parámetros geotécnicos, se podrían tomar en cuenta ciertas consideraciones.

### 3.2.5 USO DE SOFTWARE PARA CORRECCIÓN DE ERRORES

Luego de crear la base de datos será necesario el uso de un software u otro medio disponible para la corrección de errores que se presenten en la misma.

Estos errores operativos se podrían generar al ingresar de manera repetitiva los parámetros de interés a la base de datos.

### 3.2.6 GENERACIÓN DE MAPAS

Se apoyará de un software para la modelación de mapas, el cual permitirá representar la información geotécnica de manera geográfica, así como también combinar la información con otros datos disponibles y así poder crear mapas adicionales. (ArcGIS o QGIS entre otros)

Preliminarmente se elaborarán mapas que indiquen como se muestra la información obtenida a diferentes profundidades: de contenido de humedad, compacidad, tipos de suelos u otros y de esta forma analizar su comportamiento, y verificar si las interpolaciones que realice el software son coherentes.

### 3.2.7 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Se realizará un análisis e interpretación de resultados, lo anterior permitirá relacionar la información geotécnica con la geológica y así poder verificar los resultados obtenidos en los mapas.

Una vez depurada la información, se procederá a plasmarla en un solo mapa, apoyándose de tramas, isolíneas y colores, además se realizará la definición del formato que contendrá el mapa.

Según el tamaño del área de interés se establecerá la escala más adecuada, tomando en cuenta que mapas a menor escala cubren mayor extensión, sin embargo, los detalles importantes se pueden perder visualmente en éstos, en cambio a mayor escala requieren de mayor información y detalle obteniendo un resultado más preciso.

### **3.3 METODOLOGÍA APLICADA EN LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.3.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Se coordinó con la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), institución autónoma municipal, la que manifestó la existencia de información geotécnica del AMSS. Analizando la información disponible se seleccionó el Municipio de San Salvador, debido a que en este se tiene información de 480 estudios de suelos para realizar el mapa.

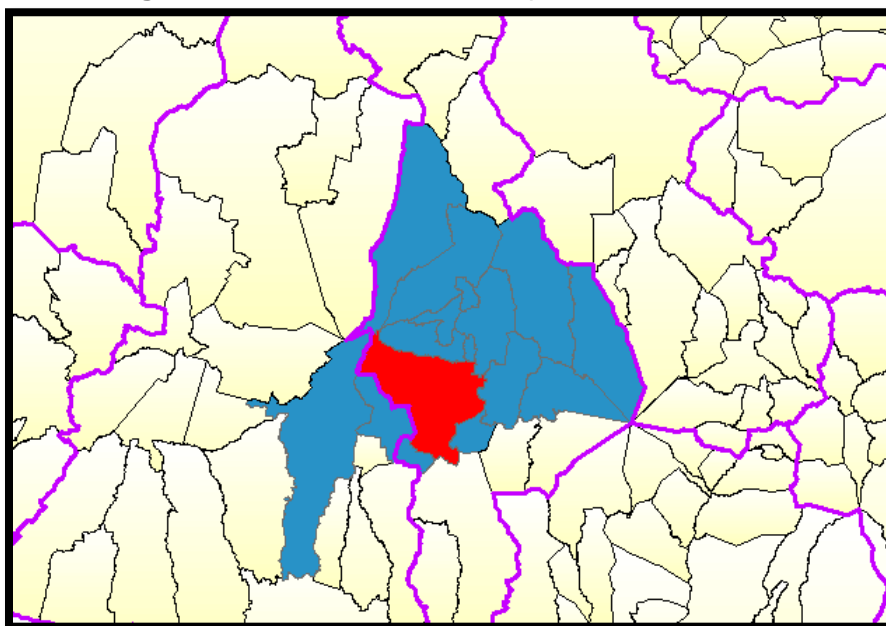
- **Características generales del área de interés**

El Municipio de San Salvador, capital del país, cuenta con una extensión territorial de 72.25 kilómetros cuadrados, tiene una población de más de 320 mil habitantes y se encuentra a 685.0 m de altura sobre el nivel del mar. Es un municipio con un alto nivel de desarrollo urbanístico, la geología predominante es de Tierras Blancas Jóvenes (TBJ) producto de la erupción



de la Caldera de Ilopango y estratos volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador. En la figura No.3.1 se muestra con color rojo el área delimitada del municipio de San Salvador.

**Figura No.3.1** Área del Municipio de San Salvador.



FUENTE: Geo portal del Centro Nacional de Registro.

### 3.3.2 REQUERIMIENTO MÍNIMO PARA ELABORAR UN MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

- **Obtención de información geotécnica**

La OPAMSS facilitó 480 estudios de suelos realizados en el Municipio de San Salvador, posteriormente dichos estudios de suelos se sometieron a un proceso de revisión y selección de información requerida (digitalización).

- **Revisión y selección de parámetros geotécnicos**

Luego de digitalizar los estudios de suelos, se obtuvo de los informes geotécnicos recopilados, los parámetros que se presentan en tabla No.3.2.

**TABLA No. 3. 2** Parámetros geotécnicos requeridos de estudios de suelos.

<b>PARÁMETROS GEOTÉCNICOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Resistencia a la penetración ( $N_{\text{campo}}$ )	De los estudios de suelo recopilados se tomaron los valores de N registrados por cada incremento, determinando así el $N_{\text{campo}}$ .
Clasificación/descripción de suelo	Se realizó una recopilación de la clasificación visual-manual establecida por los laboratorios, además se incluyó una descripción general del porcentaje de material que contiene la muestra de suelo recuperada del ensayo SPT.
Contenido de humedad	Contenidos de humedad para las épocas seca y lluviosa.

FUENTE: De los autores.

Se tomó la decisión de omitir los siguientes parámetros: ángulo de fricción interna, la cohesión y el peso volumétrico; debido a la variabilidad del criterio utilizado por cada laboratorio de suelos, la falta de confiabilidad en las correlaciones utilizadas mediante el ensayo SPT y en la mayoría de los casos la ausencia del mismo en los estudios de suelos.

- **Referencia geográfica y mapas disponibles del municipio de San Salvador**

La OPAMSS proporcionó también los siguientes mapas digitales del Municipio de San Salvador:

- Mapa Topográfico, contenía las coordenadas planas y las elevaciones de todos los puntos en estudio, además representaba las parcelas donde fueron realizados los estudios de suelos.

- Mapa geológico, con la clasificación geológica, edad y tramas de colores que las identifican.
- Mapa de sombras del relieve del AMSS.
- Mapa de división territorial del municipio de San Salvador.
- Mapa de vías terrestres del municipio de San Salvador.

### 3.3.3 ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS.

Con base a la información recolectada, se definieron los campos a incluir en la base de datos los cuales se muestran en la tabla No.3.3.

**TABLA No. 3.3** Descripción de campos de base de datos.

<b>CAMPOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
EXPEDIENTE	Código del expediente del estudio de suelos.
PROYECTO	Tipo de obra civil.
COORDENADAS	Coordenadas geográficas (X, Y)
ELEVACIÓN	Cota msnm.
ÉPOCA	Época en que se realizó el estudio. Lluviosa (mayo-oct.) o seca (nov.-abril)
FECHA	Fecha de realización del estudio.
SONDEOS	Número de perforaciones realizadas en el estudio.
PROFUNDIDAD	Metros lineales perforados.
N <sub>1</sub> (20cm)	El primer incremento, refleja las alteraciones inducidas por un ensayo previo y/o la remoción e inserción del equipo. No. golpes los primeros 20.0 cm.
N <sub>2</sub> (35cm)	No. golpes a 35.0 cm.
N <sub>3</sub> (50cm)	No. golpes a 50.0 cm.
N <sub>CAMPO</sub>	Intervalo en el que se mide la resistencia a la penetración del suelo. Suma de los golpes de los últimos 30cm (N <sub>2</sub> +N <sub>3</sub> )
CLASIFICACIÓN	Basado en la norma ASTM D2487: Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos).
DESCRIPCIÓN	Descripción e identificación (visual-manual) de los suelos, presentada por cada uno de los laboratorios, entre ellos color, %arena, %grava, presencia de orgánicos, ripio entre otros.

COMPACIDAD	<p>Debido a que los laboratorios de suelos utilizaban diferentes teorías para determinar la compacidad de los suelos granulares, se optó por realizar correlaciones con <math>N_{\text{campo}}</math> para determinar la compacidad de los suelos, basándose en la tabla No. 3.4.</p> <p><b>TABLA No.3.4</b> Compacidad para suelos granulares.</p> <table border="1" data-bbox="724 516 1256 709"> <thead> <tr> <th>No. De golpes N</th> <th>Compacidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-4</td> <td>Muy suelta</td> </tr> <tr> <td>4-10</td> <td>Suelta</td> </tr> <tr> <td>10-30</td> <td>Mediana</td> </tr> <tr> <td>30-50</td> <td>Densa</td> </tr> <tr> <td>Mayor que 50</td> <td>Muy densa</td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: Vargas M. Ingeniería de cimentaciones. Segunda edición.</p>	No. De golpes N	Compacidad	0-4	Muy suelta	4-10	Suelta	10-30	Mediana	30-50	Densa	Mayor que 50	Muy densa		
No. De golpes N	Compacidad														
0-4	Muy suelta														
4-10	Suelta														
10-30	Mediana														
30-50	Densa														
Mayor que 50	Muy densa														
CONSISTENCIA	<p>Debido a que los laboratorios de suelos utilizaban diferentes teorías para determinar la consistencia de los suelos, se optó por realizar correlaciones con <math>N_{\text{campo}}</math> para determinar la consistencia de los suelos cohesivos, basándose en la tabla No. 3.5.</p> <p><b>TABLA No.3.5</b> Consistencia para suelos cohesivos.</p> <table border="1" data-bbox="740 1003 1273 1230"> <thead> <tr> <th>No. De golpes N</th> <th>Cohesivos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0-2</td> <td>Muy blanda</td> </tr> <tr> <td>2-4</td> <td>Blanda</td> </tr> <tr> <td>4-8</td> <td>Media</td> </tr> <tr> <td>8-15</td> <td>Consistente</td> </tr> <tr> <td>15-30</td> <td>Muy consistente</td> </tr> <tr> <td><math>\geq 30</math></td> <td>Dura</td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: Vargas M. Ingeniería de cimentaciones. Segunda edición.</p>	No. De golpes N	Cohesivos	0-2	Muy blanda	2-4	Blanda	4-8	Media	8-15	Consistente	15-30	Muy consistente	$\geq 30$	Dura
No. De golpes N	Cohesivos														
0-2	Muy blanda														
2-4	Blanda														
4-8	Media														
8-15	Consistente														
15-30	Muy consistente														
$\geq 30$	Dura														
CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	Se tomó directamente de los estudios de suelos.														

FUENTE: De los autores.

### 3.3.4 CONSIDERACIONES REALIZADAS EN LA BASE DE DATOS.

Con el objetivo de uniformizar los parámetros geotécnicos obtenidos de los estudios de suelos, debido a los diferentes criterios ingenieriles asumidos por cada laboratorio, se tomaron ciertas consideraciones, entre ellas:

- No todos los laboratorios presentan en los estudios de suelos valores de  $N$  corregidos.

- Variabilidad de las clasificaciones de suelos determinadas por cada laboratorio.
- Los laboratorios de suelos se apoyaban en diferentes teorías para establecer intervalos de compacidad/consistencia en función de los valores  $N_{\text{campo}}$ .
- Se desconocía el factor que correlaciona los golpes aplicados con el equipo de punta cónica con la cuchara partida (según ASTM D1586), ya que depende del tipo de equipo utilizado por cada laboratorio.

Con base a lo anterior, las consideraciones que fueron tomadas para lograr uniformizar los parámetros geotécnicos se muestran en la tabla No. 3.6.

**TABLA No. 3.6** Consideraciones realizadas en la base de datos.

PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	CONSIDERACIONES TOMADAS
<p style="text-align: center;"><b>RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN(<math>N_{\text{CAMPO}}</math>)</b></p>	<p>Para los estudios de suelos recopilados se encontraron los siguientes casos de valores de resistencia a la penetración para los cuales se hicieron las consideraciones siguientes:</p> <p><b>Caso 1</b> (<math>N_{\text{campo}} &gt; 50</math> golpes): Para este caso la consideración que se realizó fue establecer un límite máximo de golpes <math>N_{\text{campo}} = 50</math> golpes y definir este como el estrato denso.</p> <p><b>Caso 2</b> (<math>N_{\text{campo}} =</math> Rechazo a penetración con punta cónica): Para valores de “RPC” (Rechazo a penetración con punta cónica), PP (Penetración con punta cónica), R (Rechazo) se consideró asignarle un valor de <math>N=50</math> golpes, indicando un estrato resistente, debido a que en campo se utiliza el equipo de penetración con punta cónica para verificar la continuidad del estrato resistente encontrado con la cuchara partida.</p>

**CLASIFICACIÓN DE SUELO**

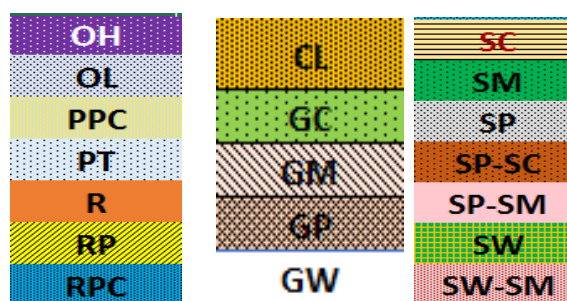
Del análisis de la información que contenían los estudios de suelos, se detectó que las clasificaciones de los suelos no correspondían a los del SUCS (ver tabla No. 3.7), obteniéndose un total de 34 clasificaciones por lo que se detectó la necesidad de uniformizarlo en base al sistema de clasificación SUCS (ASTM D2487), la que se realizó además apoyándose en la descripción de los suelos y la estratigrafía, obteniéndose al final 21 tipos de suelos, como se muestra en la figura No.3.2.

**TABLA No. 3.7** Ejemplos del análisis de reducción de clasificaciones.

Clasificación Lab.	Prof.	Análisis	SUCS
SM-OL+RP	0.5 m	Por ser estrato superficial, se consideró como orgánico	OL
SM+G	2.0 m	En los estratos superiores prevalecía "SM" y para mantener la continuidad del estrato se uniformizó dicho valor.	SM
SP+G	3.5 m	En los estratos superiores prevalecía "SP" y para mantener la continuidad del estrato se uniformizó dicho valor.	SP

FUENTE: De los autores.

**Figura No.3.2.** Resumen de clasificación de suelos.



FUENTE: De los autores

<b>COMPACIDAD Y CONSISTENCIA</b>	<p>Para los valores de compacidad/consistencia, estuvieron en función del <math>N_{\text{campo}}</math> y de la clasificación del suelo determinada en los informes geotécnicos.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Se realizó una simplificación para los suelos clasificados como SM, ML (en caso que no presente plasticidad), SP, SG, SC ya que se consideraron como “FRICCIONANTES” por ser suelos granulares, por lo tanto, se aplicó su respectivo grado de compacidad.</li> <li>2) Suelos clasificados como OL, CH y CL se consideraron como “COHESIVOS” por lo tanto se aplicó su respectivo grado de consistencia.</li> <li>3) Los suelos fuera de las clasificaciones mencionadas en los numerales 1 y 2 no aplicaron para valores de consistencia o compacidad por lo tanto se colocó en la base de datos el valor N/A (no aplica) para estos suelos.</li> <li>4) Sondeos que no fueron clasificados por motivo de penetración con punta cónica o que no hubo recuperación de muestra, se colocó N/A (no aplica) para estos suelos.</li> </ol>
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD</b>	<p>No se le asignó valor al campo de humedad, cuando en los sondeos no se obtiene recuperación de la muestra o se realizó penetración con punta cónica.</p>

FUENTE: De los autores

### 3.3.5 USO DE SOFTWARE gINT Logs

La función principal del software gINT Logs es de gestionar los datos del subsuelo y elaborar informes geotécnicos, como pueden ser de perforaciones y registros de pozos. Los registros de los informes geotécnicos pueden incluir prácticamente cualquier tipo de subsuelo, ya sea medioambiental, geofísico, petrolero, minero, entre otros. Esta herramienta permite: introducir o importar datos rápidamente e imprimir o exportar informes de registros, sin embargo, en la presente investigación esta herramienta se utilizó para la revisión de la base de datos.

Se realizó una revisión de todos los registros de la base de datos por medio de este software con el objetivo de depurar los errores que se produjeron en la elaboración de la misma.

Para el proceso de depuración se crearon tres hojas adicionales en el libro de Excel denominadas: POINT, GEOL e ISPT referenciadas a la base original denominada "CALCULO", las cuales fueron exportadas a gINT Logs para corregir los errores de la base de datos. En las figuras Nos. 3.3, 3.4 y 3.5 se presentan los campos de cada una de las hojas que fueron exportadas al software.

**Figura No.3.3** Hojas de POINT exportadas al programa gINT Logs.

PointID	HoleDepth	Elevation	North	East	LOCA_STAR	LOCA_ENDD	LOCA_PURP	LOCA_REM
'Location Identifier	Final Depth	Local Ground	Local North	Local East	Start Date	End Date	Purpose	Remarks
S1_0220-2006	3,00	0,00	0,00	0,00	16-oct-06	16-oct-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S2_0220-2006	3,00	0,00	0,00	0,00	16-oct-06	16-oct-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S3_0220-2006	3,00	0,00	0,00	0,00	16-oct-06	16-oct-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S1_0862-2006	5,00	640,00	479617,83	287143,07	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S2_0862-2006	4,00	640,00	479617,17	287135,79	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S3_0862-2006	4,00	640,00	479613,07	287130,24	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S4_0862-2006	4,75	640,00	479609,37	287126,80	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S5_0862-2006	4,75	640,00	479607,25	287132,62	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S6_0862-2006	4,75	640,00	479607,45	287141,99	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S7_0862-2006	4,25	640,00	479614,39	287120,85	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S8_0862-2006	4,25	640,00	479617,04	287126,00	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S9_0862-2006	4,00	640,00	479619,42	287131,56	31-ago-06	31-ago-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	LLUVIOSA
S1_0071-2007	7,00	640,00	480461,72	288431,12	16-nov-06	16-nov-06	CONSTRUCCION DE BASE GEOTECNICA	SECA

FUENTE: De los autores.



**Figura No.3. 4** Hojas de GEOL exportadas al programa gINT Logs.

PointID	Depth	GEOL_BASE	GEOL_DESC
'Location Identifier	Top Depth	Base Depth	Description
S1_0220-2006	0	0,5	LIMO ARENOSO CON PRESENCIA DE ORGANICO -(ML-OL)
S1_0220-2006	0,5	0,75	LIMO ARENOSO-(ML)
S1_0220-2006	0,75	1	LIMO ARENOSO-(ML)
S1_0220-2006	1	1,25	LIMO ARENOSO-(ML)
S1_0220-2006	1,25	1,5	LIMO ARENOSO-(ML)
S1_0220-2006	1,5	1,75	LIMO ARENOSO-(ML)

FUENTE: De los autores

**Figura No.3. 5** Hojas de ISPT exportadas al programa gINT Logs.

PointID	Depth	ISPT_NVAL	ISPT_WAT	ISPT_INC1	ISPT_INC2	ISPT_INC3
'Location Identifier	Top depth (m)	Spt 'N' Value	Water Depth (%)	Blows 1	Blows 2	Blows 3
S11_0499-2010	2,5	21	24,9	15	13	8
S11_0499-2010	3	29	29,2	18	16	13
S11_0499-2010	3,5	34	30,9	14	18	16
S11_0499-2010	4	27	23,5	13	13	14
S11_0499-2010	4,5	20	37,7	10	10	10
S11_0499-2010	5	12	38,3	7	6	6
S11_0499-2010	5,5	12	39,7	5	6	6
S11_0499-2010	6	39	32,5	7	18	21
S11_0499-2010	6,5	8	44,4	8	4	4

FUENTE: De los autores.

En la tabla No. 3.8 se muestran los errores más comunes obtenidos en la base de datos.

**TABLA No. 3. 8** Errores obtenidos en base de datos mediante el software.

ERRORES	DESCRIPCIÓN
POINT: Clave: 'S1_0256-2001' No se permite sobrescribir.	Valor de clave duplicado.
POINT: Clave: 'S4_1084-2005' Campo 'North', Valor '475,991.3312 m',	La entrada debe ser numérica.
<p>GEOL: Clave: 'S1_0902-2005' No se pueden agregar registros con esta clave padre. Se requiere un registro relacionado en la tabla 'POINT'.</p> <p>GEOL: Clave: 'S1_0902-2006' No se pueden agregar registros con esta clave padre. Se requiere un registro relacionado en la tabla 'POINT'.</p> <p>GEOL: Clave: 'S1_0902-2008' No se pueden agregar registros con esta clave padre. Se requiere un registro relacionado en la tabla 'POINT'.</p>	Se requiere un registro relacionado en la tabla 'POINT'. Error a la hora de desplazar el año de los estudios de suelos.
<p>Deepest depth must be equal to the hole depth (5)</p> <p>Table: GEOL</p> <p>Data set: S4_00061-2007</p> <p>Row 11 (Keys: 5,5.5), Column 'GEOL_BASE'</p>	El campo de 'Deepest depth' de la base de datos, debe coincidir con el campo "hole depth" de la hoja POINT y con la columna 'GEOL_BASE' perteneciente a la hoja GEO.
<p>Deepest depth must be less than or equal to the hole depth (5.5)</p> <p>Tabla: ISPT</p> <p>Conjunto de datos: S8_1088-2005</p> <p>Fila 11 (Claves: S8_1088-2005,99.5), Columna 'Depth'</p>	El campo de 'Deepest depth' de la base de datos, debe coincidir con el campo "hole depth" de la hoja POINT y con la columna 'Depth' perteneciente a la hoja ISPT.

FUENTE: De los autores.

Luego de haber identificado los errores en la base de datos, se procedió a realizar la corrección de estos, este proceso se realizó hasta que el programa gINT Logs no detectara ningún error.

### 3.3.6 GENERACIÓN DE MAPAS

Para definir las profundidades de análisis en una primera etapa se elaboraron diferentes mapas cada uno con las siguientes propiedades geotécnicas: contenido de humedad, compacidad de suelos y clasificación de suelos. Se realizaron mapas a profundidades desde uno hasta cinco metros, ya que a profundidades mayores o iguales a seis metros se observó que la población de datos disminuía conforme aumentaba la profundidad de perforación. Luego se realizó una comparación de los resultados geotécnicos obtenidos de cada profundidad, se identificó que el comportamiento de las variables entre uno y dos metros era similar. Para las profundidades restantes se determinó que el estrato que presenta una mayor cantidad de datos con compacidades densas se encontró a cinco metros, al observar estos resultados y por recomendación de los asesores se decidió elaborar los mapas a dos y cinco metros de profundidad. La profundidad de dos metros permite conocer las condiciones del suelo superficialmente y, considerando que el nivel de desplante que generalmente se utiliza para la construcción de viviendas de uno y dos niveles es de 1.5 m de profundidad. Con una profundidad de cinco metros se definió el estrato denso, ya que se observaron  $N_{\text{campo}}$  mayores a 30 golpes.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se elaboraron tres mapas a dos y cinco metros, cada uno con propiedades geotécnicas diferentes:

- Mapa de curvas de contenido de humedad en estación seca y lluviosa.
- Mapa de compacidad de suelos.

- Mapa de clasificación de suelos.

### 3.3.7 SOFTWARE DE MODELACIÓN DE MAPAS

Se utilizó el ArcGIS Desktop, es el nombre de un conjunto de productos de software en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG, incluye dos aplicaciones principales, que se utilizan para el mapeo y la visualización: ArcMap y ArcGIS Pro. Para la elaboración del mapa se aplicó ArcMap para mapeo, edición, análisis y administración de datos, ya que permite representar información geográfica como una colección de capas y otros elementos en una vista de mapa.

Para modelar los mapas mencionados se utilizó herramientas de interpolación para crear una superficie continua (o predicción) a partir de valores de puntos de una muestra.

ArcMap tiene varios tipos de interpolación, para modelar el mapa de contenido de humedades y el mapa de compacidad de suelos, se utilizó el *Topo to Raster*. Este método de interpolación está diseñado para crear modelos digitales en los cuales se conoce la variable de elevación.

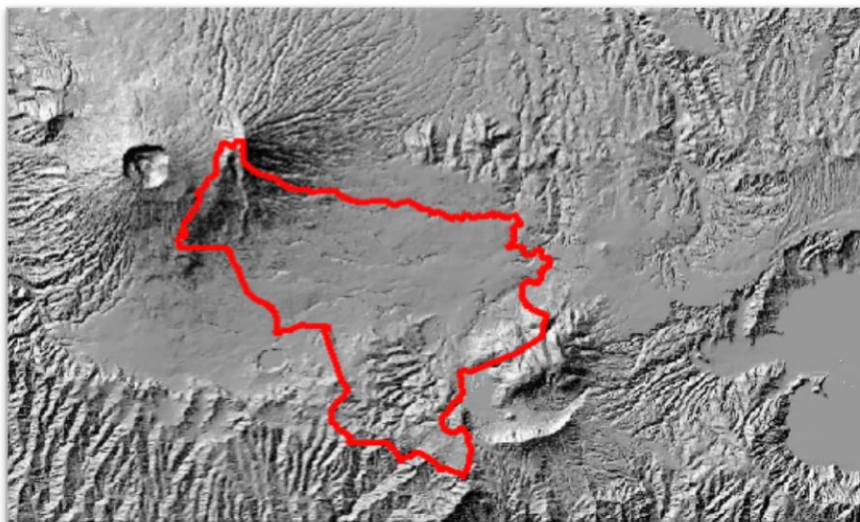
En el caso del mapa de clasificación de suelos, se utilizó el método de interpolación *Kriging Bayesiano Empírico (EBK)*, es un método de interpolación de estadísticas geográficas que automatiza los aspectos más complejos de la creación de un modelo kriging válido. Otros métodos kriging de Geostatistical Analyst requieren el ajuste manual de los parámetros para obtener resultados

precisos, pero EBK calcula automáticamente esos parámetros por medio de un proceso de creación de subconjuntos y simulaciones. Una de las ventajas de este método es que los errores estándar de la predicción son más precisos que en otros métodos kriging.

Como se explicó anteriormente, se creó una base de datos en EXCEL donde se tiene la información geotécnica y geográfica (el sistema de coordenadas empleado fue *El Salvador Conformal Conic* con proyección *Lambert\_Conformal\_Conic*) de los 480 estudios de suelos que se realizaron en el municipio de San Salvador.

Para referenciar los resultados de los mapas en el área de interés se hizo uso de un mapa del perímetro del municipio de San Salvador y un mapa de sombras del relieve del AMSS, a partir del cual se identificaron las formaciones geológicas como la cordillera del Bálsamo y volcán de San Salvador que delimitan al municipio, la cual se puede visualizar en la figura No.3.6.

**Figura No.3. 3** Mapa de sombras y perímetro del municipio de San Salvador.



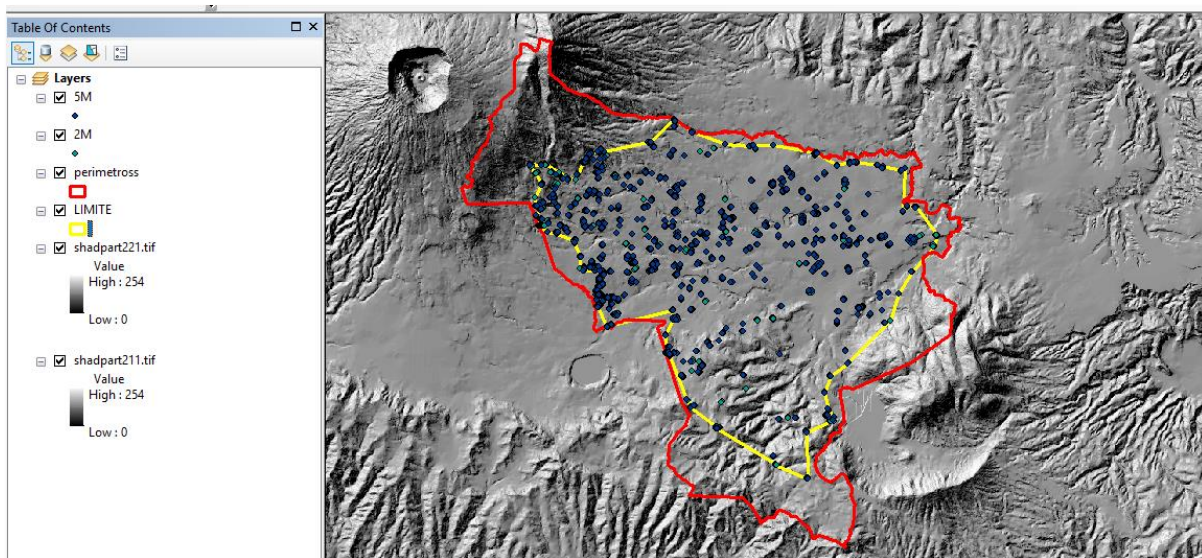
FUENTE: Archivo shape proporcionada por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).

Para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas de las profundidades de interés, se creó un formato llamado *shapefiles*, para ello se seleccionó de la tabla de atributos los puntos que corresponden a profundidades de dos y cinco metros.

Posteriormente se realizó un polígono denominado “LIMITE”, trazado sobre los puntos frontera de la base de datos y así obtener una mayor precisión en los resultados de las interpolaciones, evitando la extrapolación.

En la figura No.3.7 se visualiza en la tabla de contenido las cuatro capas bases, donde cada una de ellas representa un conjunto de datos que contiene valores de cada variable a utilizar con las cuales se realizara la modelación los mapas.

**Figura No.3.4** Capas superpuestas en el mapa.



FUENTE: De los autores.

**NOTA:**

Se presenta las siguientes capas:

2M: corresponde a la profundidad de dos metros.

5M: corresponde a la profundidad de cinco metros.

Perímetro SS: corresponde al perímetro del municipio de San Salvador.

LIMITE: corresponde al polígono formado por los puntos frontera de 2M y 5M.

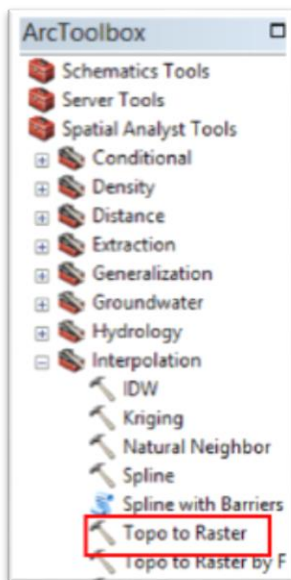
A continuación, se describe la elaboración de cada uno de los siguientes mapas con sus respectivas propiedades geotécnicas: curvas de contenido de humedad en estación seca y lluviosa, compacidad de suelos y clasificación de suelos.

### A. Mapa de contenido de humedad

Para este mapa se utilizó el método de interpolación *Topo To Raster*, el cual brindo mejores resultados. Este mapa muestra isolíneas del contenido de humedad para estación seca y lluviosa a profundidades de dos y cinco metros. Los intervalos de contenido de humedad se presentan a cada 10% para una mejor visualización del mapa.

Los pasos a seguir para la interpolación se presentan a continuación: Dentro del cuadro de herramientas Arctoolbox, **se seleccionó la opción *Spatial Analyst Tools*, en la cual se encuentra la herramienta de *Interpolation* donde se definió el método *Topo to Raster* como se muestran en la Figura No. 3.8.**

**Figura No.3. 5** Pasos a seguir para el método de interpolación “Topo To Raster”.



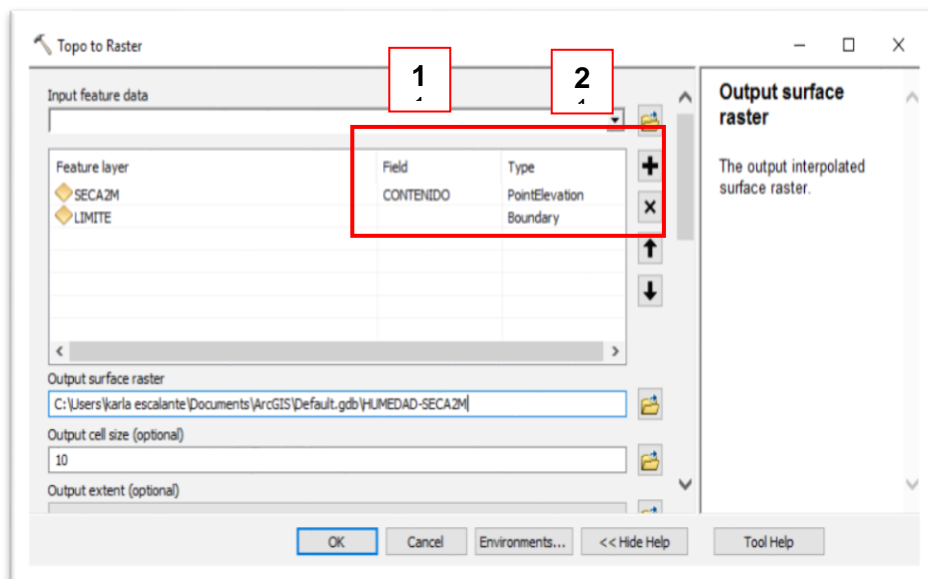
FUENTE: De los autores.

Luego se seleccionó el parámetro *Input feature Data*, que permite introducir los shapefiles a utilizar para realizar la interpolación, figura No.3.9



Los datos a utilizar son: un shapefile de puntos con valores de contenido de humedad a interpolar y un shapefile de polígono que contiene los datos de la condición de frontera.

**Figura No.3. 6** Shapefiles seleccionados en método de interpolación *Topo To Raster*.



FUENTE: De los autores.

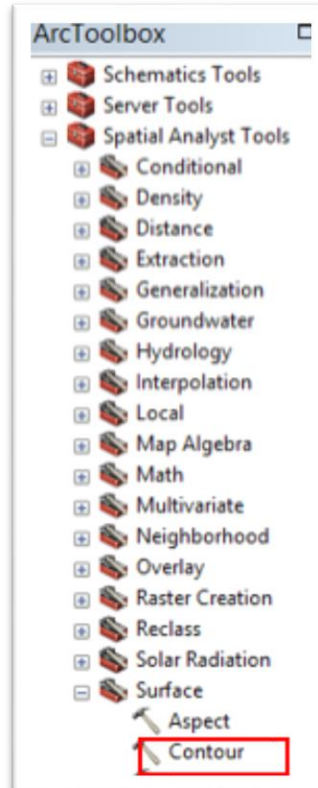
Los numerales 1 y 2 contenidos en la figura No.3.9 representan:

- 1) El campo de la capa, en este caso se llama **CONTENIDO**.
- 2) La función que hará cada capa, para su desarrollo se introduce al sistema archivos que contengan los puntos que representan elevaciones de superficie (PointElevation) y el shapefile de polígono con la condición de frontera para la realización de la interpolación (Boundary).

Para generar las isolíneas de contenido de humedad, se utiliza la herramienta *Contours* que son conjuntos de líneas de igual valor en una superficie.

Los pasos que se realizaron para generar isolíneas de humedades son los siguientes: dentro del cuadro de herramientas Arctoolbox, **se seleccionó *Spatial Analyst Tools*, donde se encuentra la opción *Surface*, definiendo así la herramienta *Contour*, como se muestran en la figura Nos.3.10**

**Figura No.3.10** Pasos a seguir para la herramienta *Contour*.

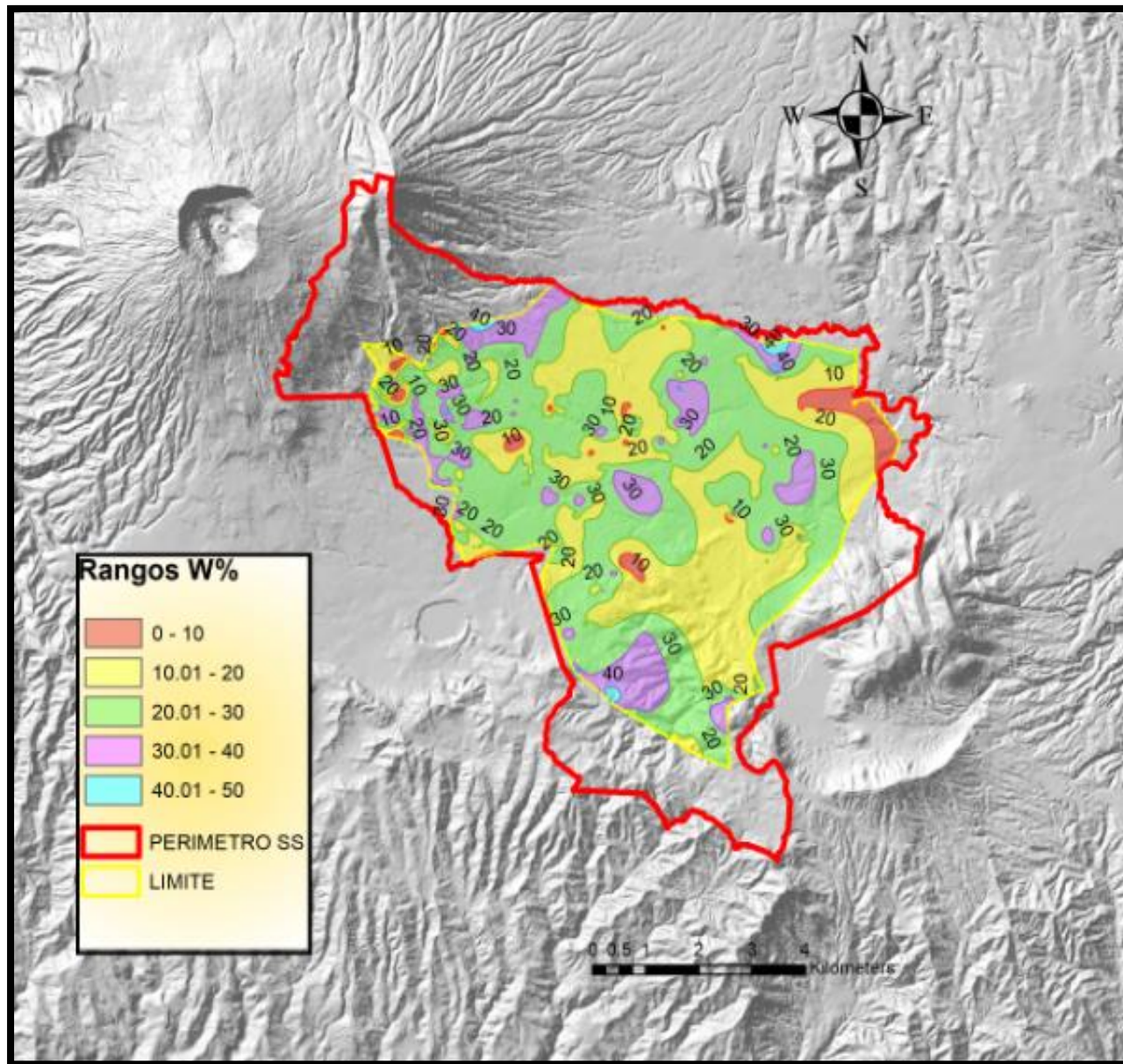


vas

FUENTE: De los autores.

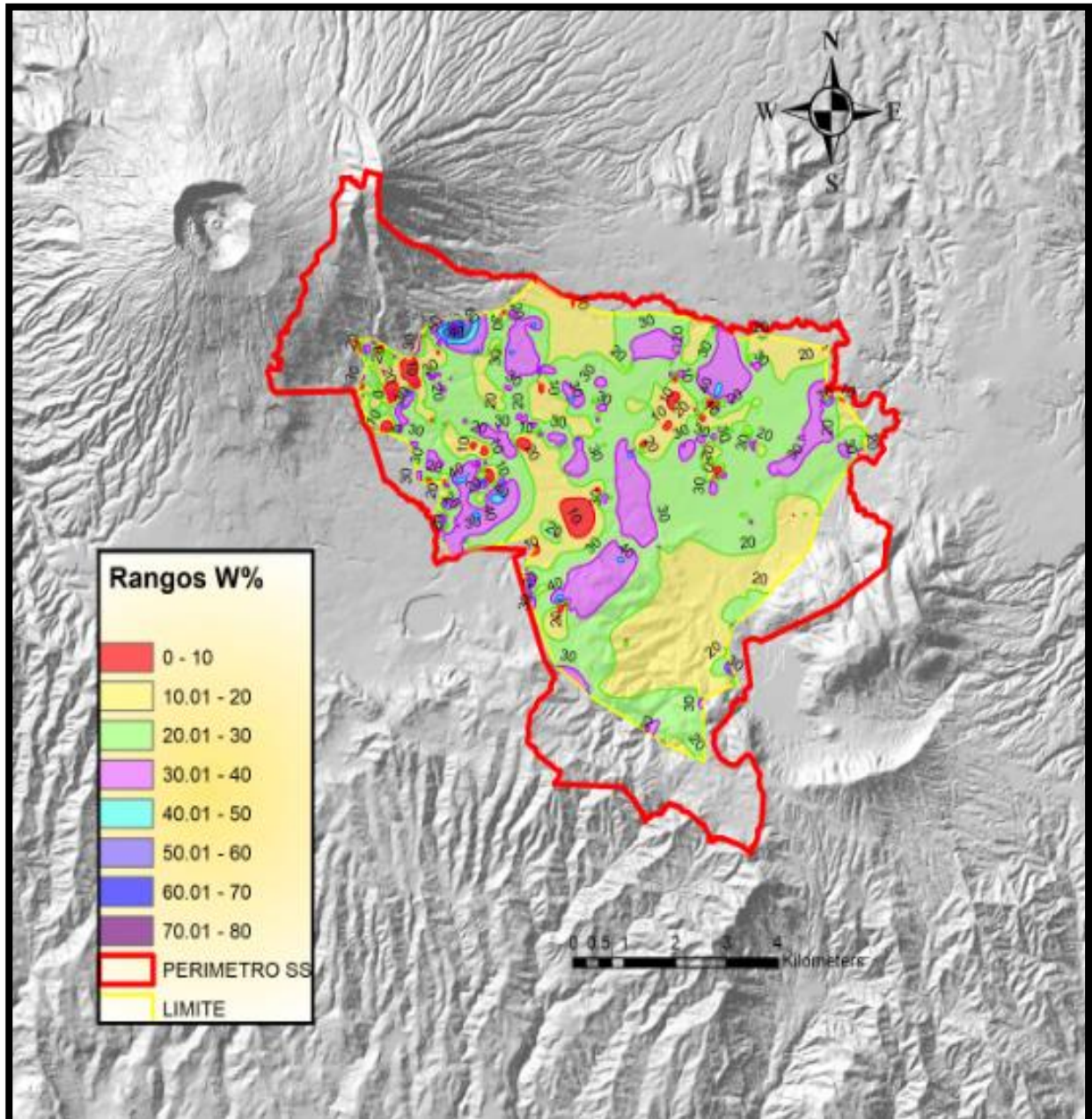
En la figura Nos.3.11 y 3.12 se presentan los mapas de contenido de humedad en estación seca y lluviosa para dos metros de profundidad respectivamente y en la figura Nos. 3.13 y 3.14 se muestran los mapas para cinco metros.

**Figura No.3. 8** Mapa de curvas contenido de humedad en estación seca a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores.

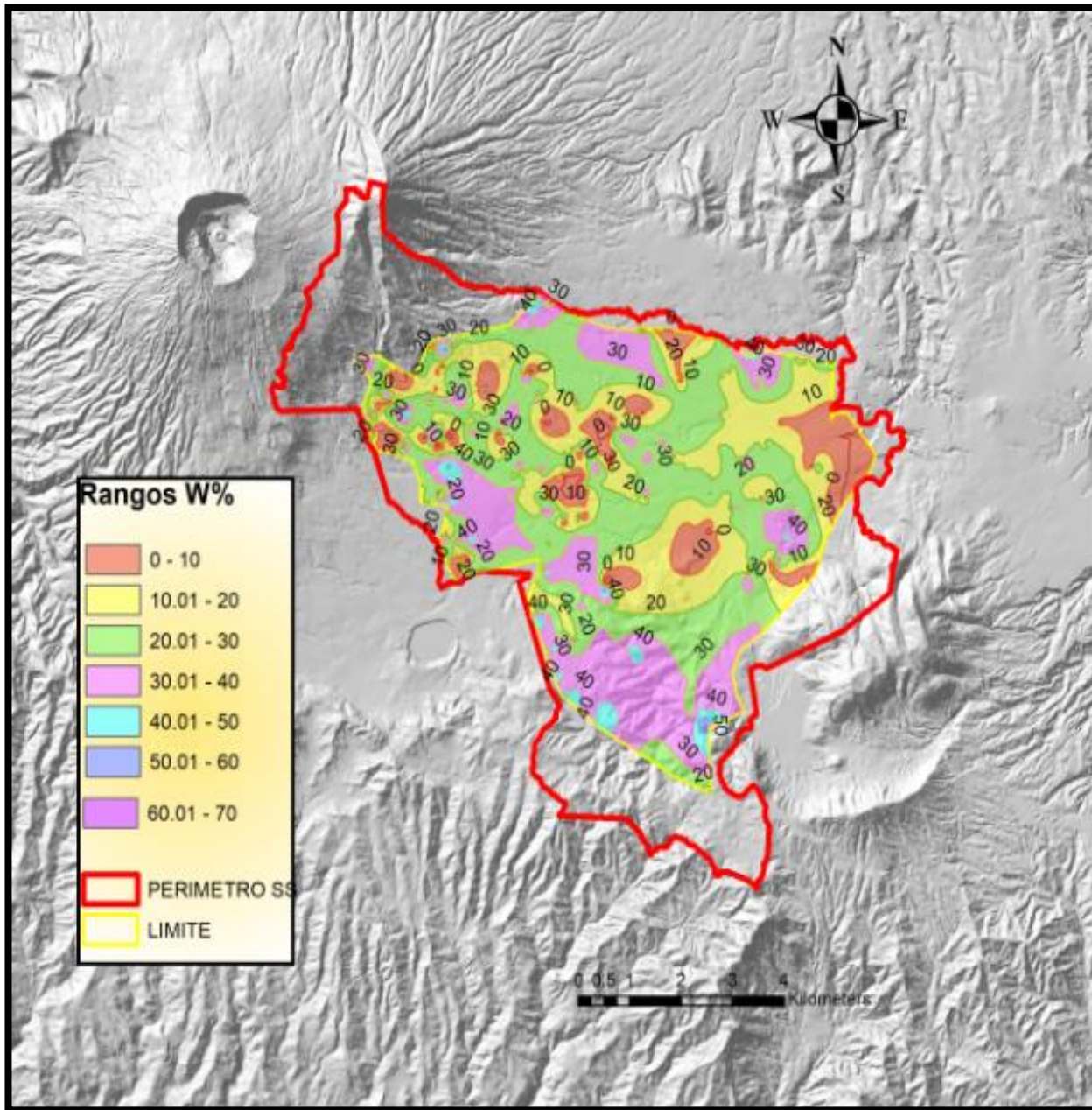
**Figura No.3. 9** Mapa de curvas contenido de humedad en estación lluviosa a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores.

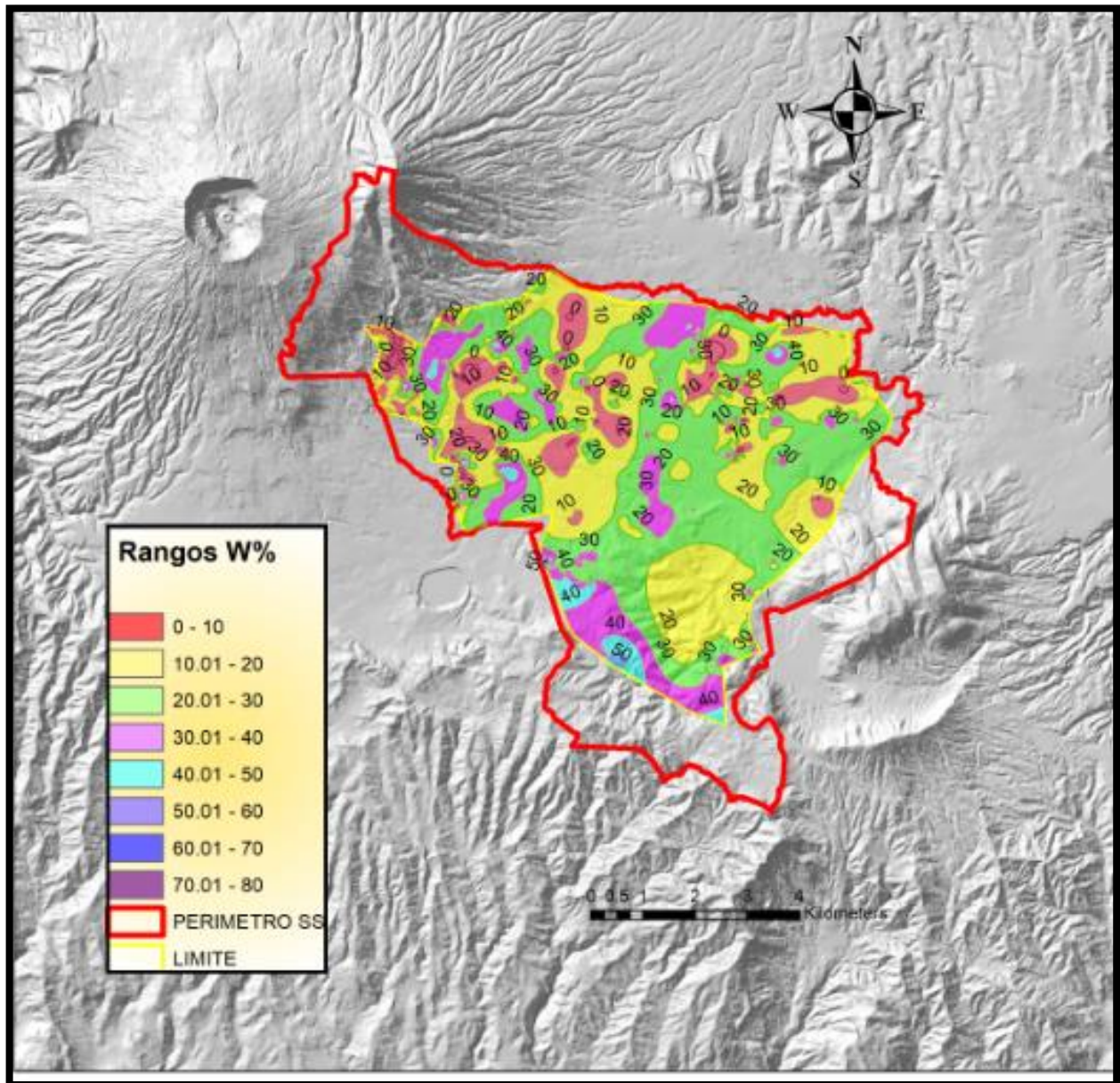


**Figura No.3. 10** Mapa de curvas contenido de humedad en estación seca a una profundidad de cinco metros.



FUENTE: De los autores.

**Figura No.3. 11** Mapa de curvas contenido de humedad en estación lluviosa a una profundidad de cinco metros

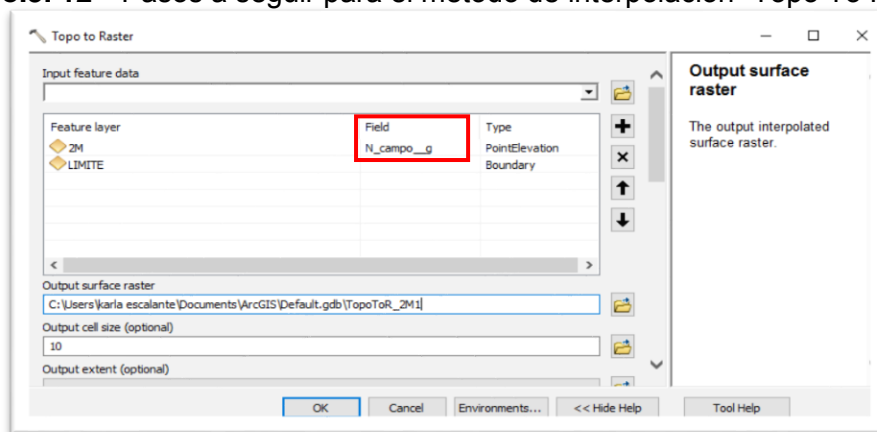


FUENTE: De los autores.

## B. Mapa de compacidad de los suelos

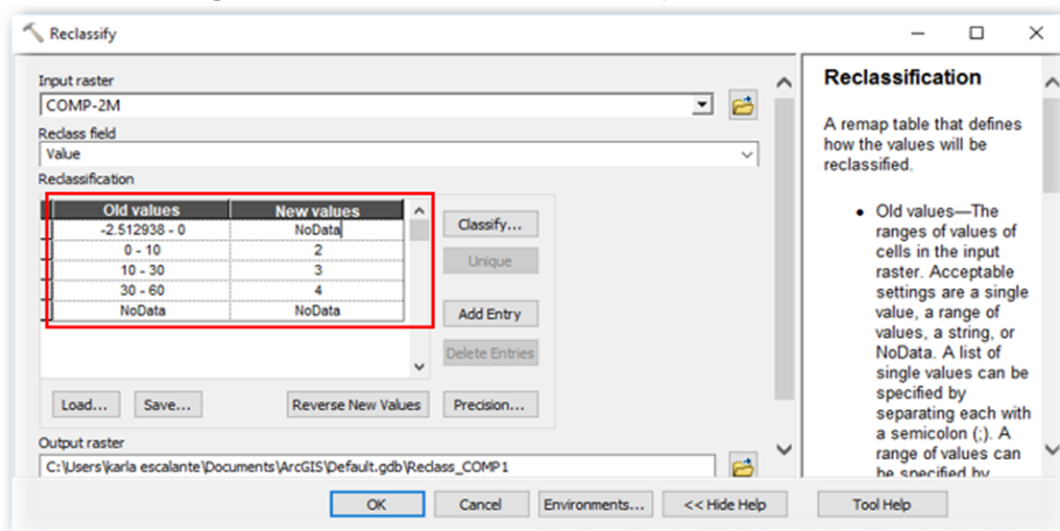
Para la elaboración del mapa de compacidad de suelos se utilizó el método de interpolación *Topo To Raster*, para seleccionar las variables a interpolar se utilizó la capa denominado “N<sub>campo</sub>”, como se observa en la figura No.3.15.

**Figura No.3. 12** Pasos a seguir para el método de interpolación “Topo To Raster”.



FUENTE: De los autores.

Para elaborar el mapa de compacidad de los suelos se realizaron pruebas en los cuales de observo que al incluir todos los rangos de las compacidades definidos en la tabla No. 3.4 del apartado 3.3.3, se obtenían resultados imprecisos producto de las interpolaciones realizadas, por lo que únicamente se definieron tres tipos de compacidades, estableciendo estas como: “sueltas” de 0-10 golpes, “medianas” de 11-30 golpes y “densas” de 31-50 golpes, logrando así una mejor representación de los resultados. Para modelar el mapa de compacidades se utilizó la herramienta “Reclassify”, como se observa en la figura No.3.16.

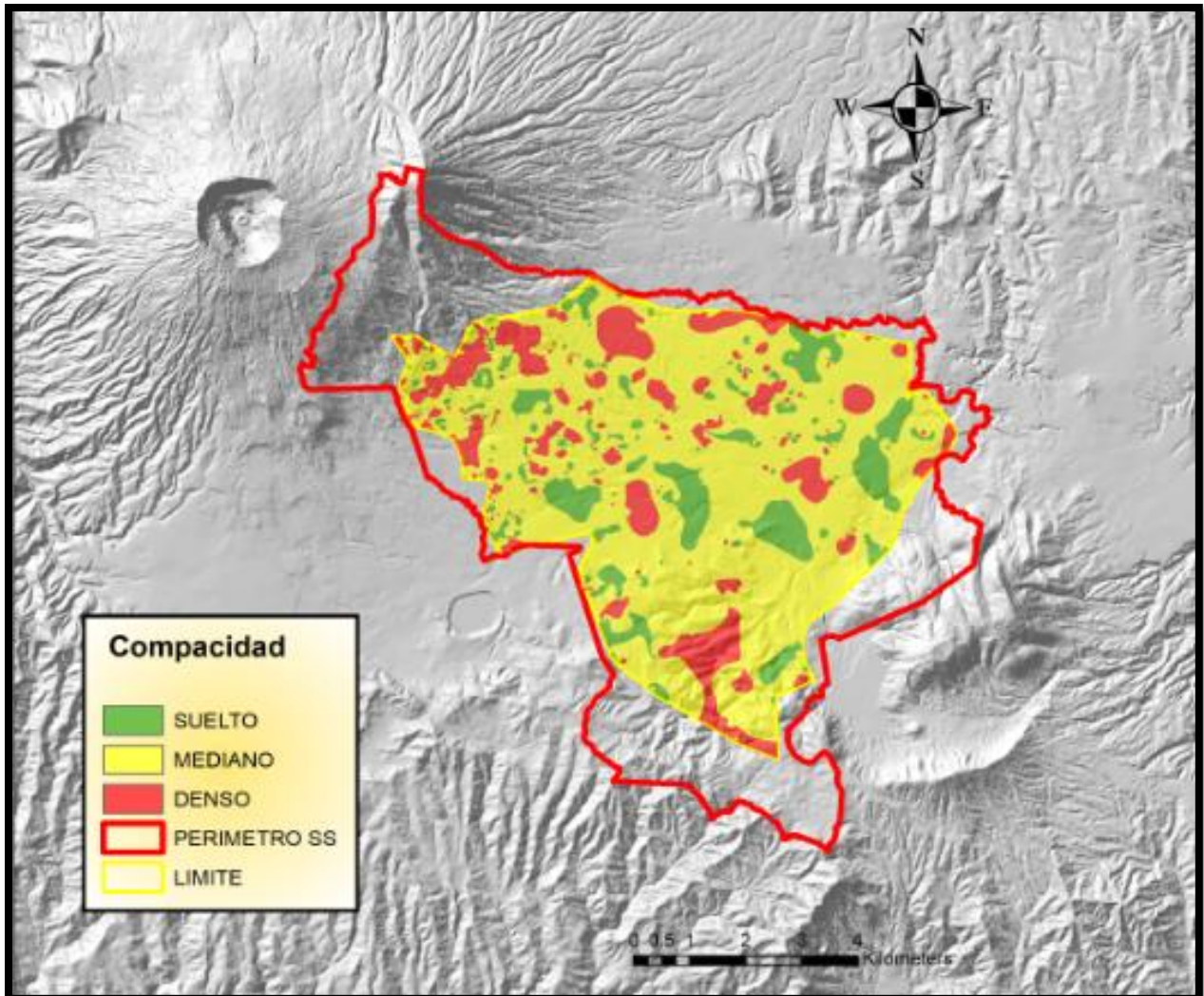
**Figura No.3. 13.** Intervalos de compacidad utilizados.

FUENTE: De los autores.

En la figura Nos 3.17 y 3.18 se presentan los mapas de compacidad de los suelos a dos y cinco metros de profundidad respectivamente.

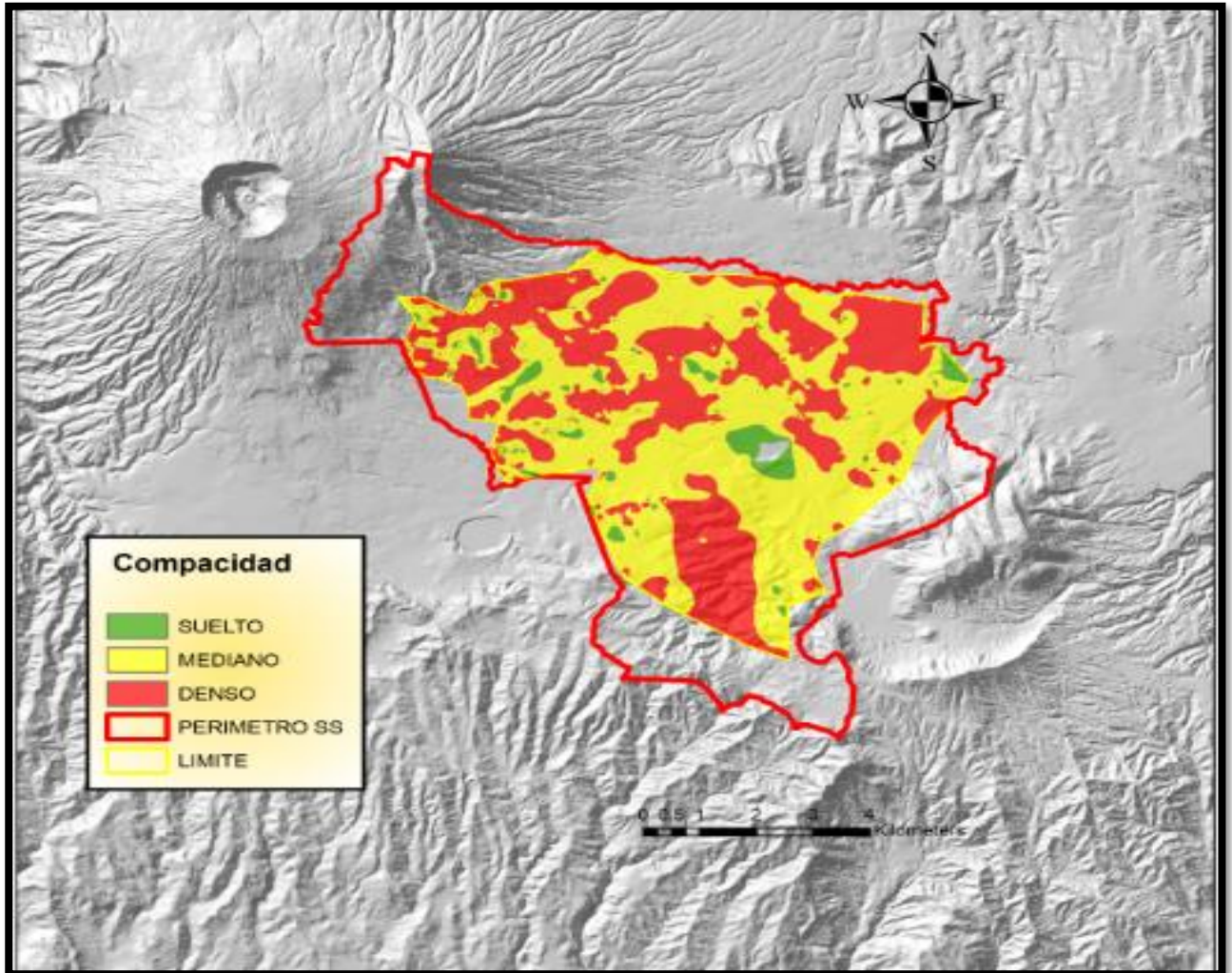


**Figura No.3.14.** Mapa de compacidad de los suelos a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores.

**Figura No. 3.15.** Mapa de compacidad de los suelos a una profundidad de cinco metros.



FUENTE: De los autores.

### **C. Mapa de clasificación de suelos**

Luego de realizar un análisis de la base de datos, se observó que existía una variabilidad en las clasificaciones de los suelos establecidas por cada uno de los laboratorios, identificando así que la mayor parte de estas no pertenece a la clasificación SUCS. La base de datos contenía 34 clasificaciones las cuales se redujeron a 21 tipos de suelos tal como se estableció en la figura No.3.2 perteneciente al apartado 3.3.4.

Se elaboró un mapa con 21 clasificaciones de suelos en el cual se observó que no presentaba de forma coherente los resultados obtenidos por el método de interpolación, debido a la variabilidad de información seleccionada, por lo que surgió la necesidad de realizar una segunda reducción de las clasificaciones, las cuales se pueden observar en la tabla No.3.9, las cuales se detallan a continuación:

- Arcilla (CL)
- Gravados (G): corresponden grava arcillosa (GC), grava limosa (GM), grava pobremente graduada (GP), grava bien graduada (GW).
- Limo de alta plasticidad (MH)
- Limo arenoso (ML)
- Orgánicos (O): limo orgánico (OL), arcilla orgánica (OH)
- Turba (PT)
- Arena arcillosa (SC)

- Arena limosa (SM)
- Arena (S): arena pobremente graduada (SP), arena pobremente graduada con arcilla (SP-SC), arena pobremente graduada con limos (SP-SM), arena bien graduada (SW), arena bien graduada con limos (SW-SM).
- Rechazo punta cónica (RPC): penetración con punta cónica (PPC), rechazo (R).
- RP: ripio

Luego por recomendación de los asesores se realizó una tercera reducción para seleccionar las clasificaciones con mayor población de datos, siendo estas: limos arenosos (ML), arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), arenas (S) y gravas (G) como se puede visualizar en la tabla No.3.9; eliminando así las que no presentaban información del tipo de suelo, siendo estas RPC y RP.

**TABLA No. 3. 9** Proceso de reducción de clasificaciones de suelos al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

CLASIFICACIÓN DE LOS LABORATORIOS DE SUELOS		PRIMERA CLASIFICACIÓN	SEGUNDA CLASIFICACIÓN	TERCERA CLASIFICACIÓN
CH	SC-OL	CL	CL	ML
CL	SM	GC	G	SM
CL-OL	SM(OL)	GM		SC
GC	SM+RP	GP		S
GM	SM+RP-OL	GW		G
GP	SM-CL	MH	MH	
GW	SM-GP	ML	ML	
MH	SM-OL	OH	O	
ML	SM-SP	OL		
ML-OL	SM-SW	PPC	RPC	
ML-RP	SP	R	RPC	
ML-SM	SP-OL	RPC	RPC	
NHR	SW	PT	PT	
OH		RP	RP	
OL		SC	SC	
PPC		SM	SM	
PT		SP	S	
R		SP-SC		
RP		SP-SM		
RPC		SW		
SC		SW-SM		

FUENTE: De los autores.

Posteriormente con base a las cinco clasificaciones establecidas anteriormente se modeló el mapa, se observó que algunas de estas no las reconoció el software ArcGIS, por lo que fue necesario realizar un análisis estadístico de estas cinco clasificaciones a profundidades de dos y cinco metros.

Para la profundidad de dos metros se tomaron las siguientes consideraciones con base a la tabla No.3.10:

- Las clasificaciones limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM) representan el 51% y 38% respectivamente del total de la muestra, conformando así la mayor población de datos.
- Las arenas arcillosas (SC) se consideraron como arenas (S), representando en conjunto el 10% del total de la muestra.
- Las gravas (G) no se consideraron en el análisis debido a que representan el 1% del total de la población de datos existentes en el área de estudio, dicha cantidad de información no fue significativa para la interpolación en el software ArcGIS.

**TABLA No. 3.10** Población de puntos para cada clasificación a una profundidad de dos metros.

CLASIFICACIÓN A 2M	CANTIDAD DE PUNTOS	PORCENTAJE (%)
ML	1,063	51
SM	804	38
SC	146	7
S	54	3
G	19	1
<b>TOTAL</b>	<b>2086</b>	<b>100</b>

FUENTE: De los autores.

Para la profundidad de cinco metros, los resultados obtenidos se muestran en la tabla No.3.11, donde se tomaron las siguientes consideraciones:

- Las clasificaciones limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM) representan el 36% y 43% respectivamente del total de la muestra, conformando así la mayor población de datos.
- Las arenas arcillosas (SC) se consideraron como arenas (S), representando en conjunto el 20% del total de la muestra.

- Las gravas (G) no se consideraron en el análisis debido a que representan el 1% del total de la población de datos existentes en el área de estudio, dicha cantidad de información no fue significativa para la interpolación en el software ArcGIS.

**TABLA No. 3. 11** Población de puntos para cada clasificación a una profundidad de cinco metros.

CLASIFICACIÓN A 5M	CANTIDAD DE PUNTOS	PORCENTAJE (%)
ML	475	36
SM	576	43
S	164	12
SC	101	8
G	13	1
<b>TOTAL</b>	<b>1329</b>	<b>100</b>

FUENTE: De los autores.

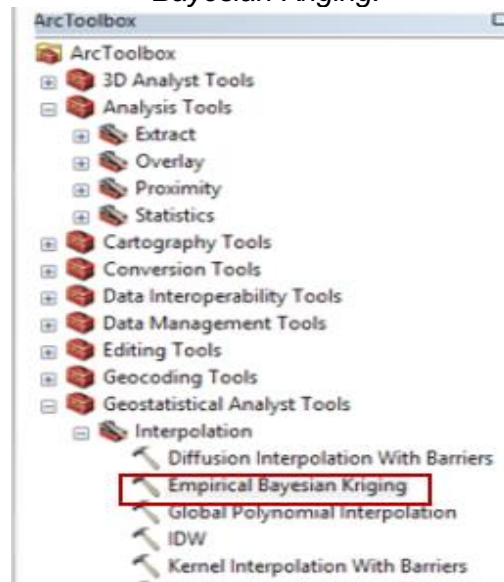
A continuación, se hizo uso del software ArcGIS para la modelación del mapa, debido a que el programa no reconoce letras para realizar las interpolaciones, se asignó valores numéricos a las clasificaciones SM, ML y S para ambas profundidades; esto permitió utilizar el método de interpolación *Empirical Bayesian Kriging*. Este método presentó mejores resultados en comparación con los otros métodos kriging, ya que los errores estándar de la predicción son más precisos.

El procedimiento que se realizó para generar el mapa de clasificación de suelos fue el siguiente: dentro del cuadro de herramientas Arctoolbox, en la opción Geostatistical Analyst Tools, en la cual se encuentra la herramienta de Interpolation



donde se definió el método Empirical Bayesian Kriging. Como se muestran en la figura No.3.19.

**Figura No.3. 16** Pasos a seguir para el método de interpolación *Empirical Bayesian Kriging*.

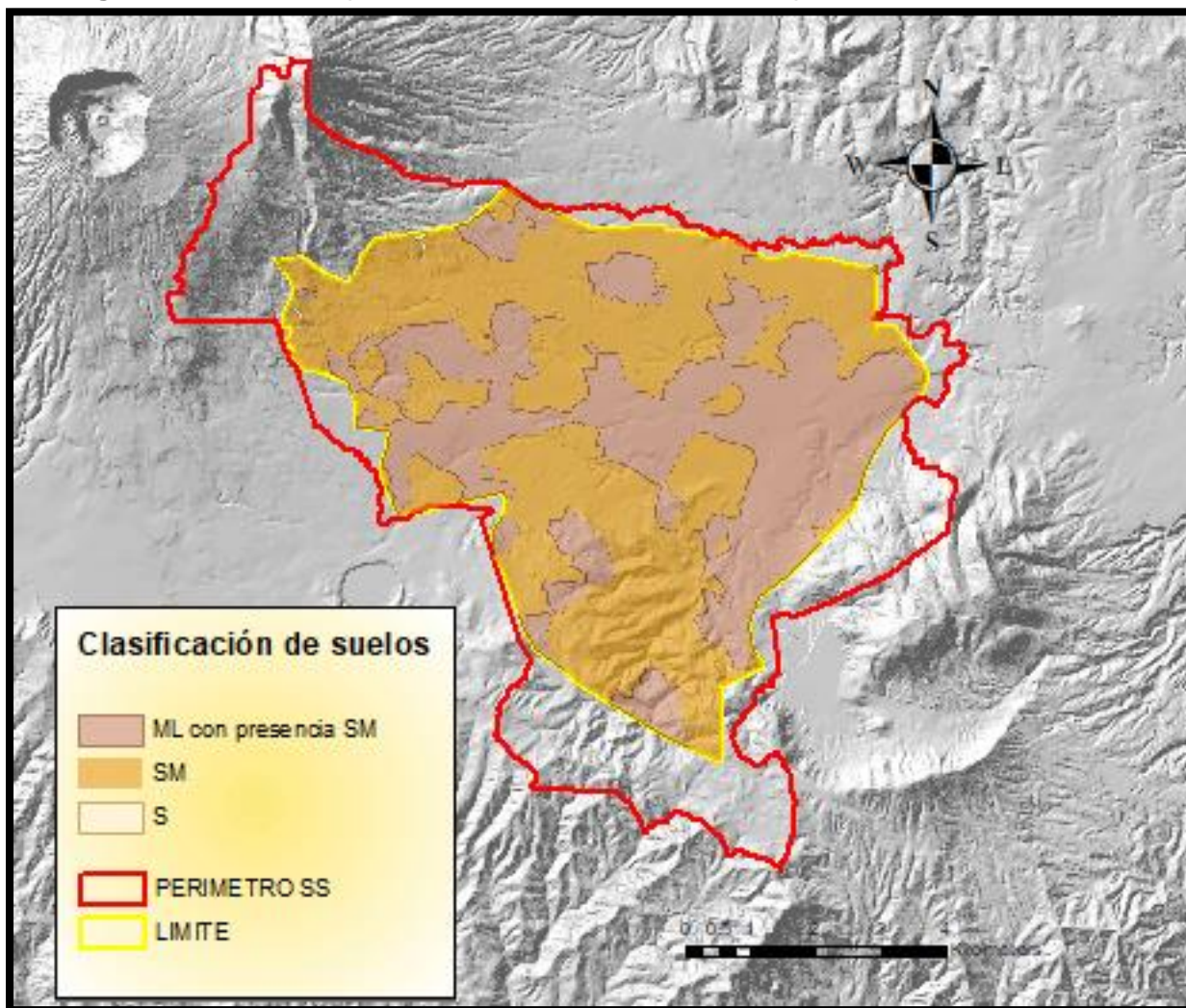


FUENTE: De los autores.

La figura No. 3.20 muestra el mapa de clasificación de los suelos a dos metros de profundidad, donde se utilizaron tres clasificaciones: limos arenosos (ML), arenas limosas (SM) y arenas (S), se identificaron zonas del mapa en las que el software ArcGIS no logró realizar una distinción entre los ML y SM, por lo que la clasificación de los limos arenoso se definió como “ML con presencia en algunas zonas de arenas limosas”.



**Figura No. 3.17** Mapa de clasificación de suelos a una profundidad de dos metros.

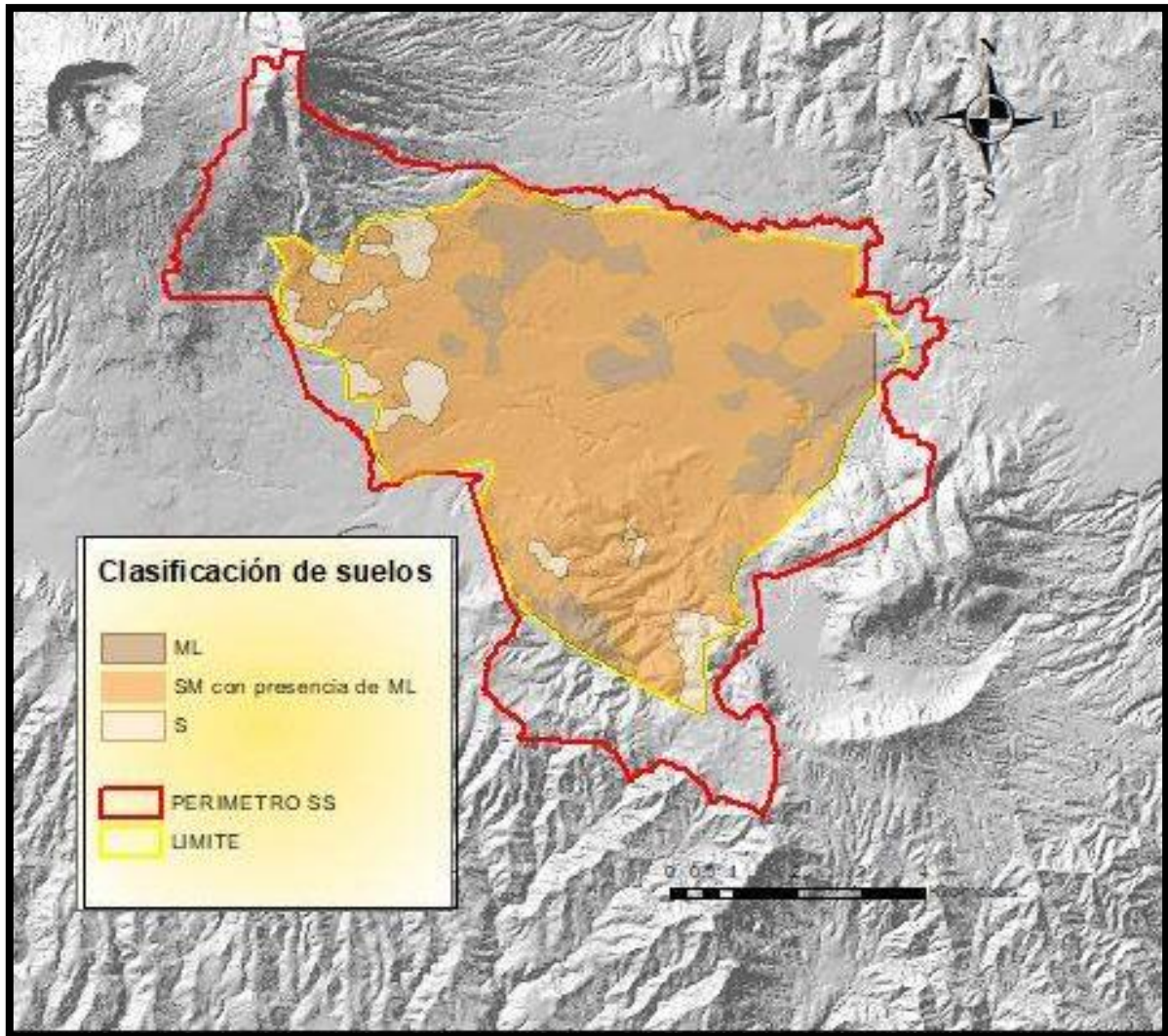


FUENTE: De los autores.

La figura No. 3.21 muestra el mapa de clasificación de los suelos a cinco metros de profundidad, donde se utilizaron tres clasificaciones: limos arenosos (ML), arenas limosas (SM) y arenas (S), se identificaron zonas del mapa en las que el software ArcGIS no logro realizar una distinción entre los ML y SM, por lo que la

clasificación de las arenas limosas se definió como “SM con presencia en algunas zonas de limos arenosos”.

**Figura No.3. 18** Mapa de clasificación de suelos a una profundidad de cinco metros.



FUENTE: De los autores.

### 3.4 MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Producto de los mapas parciales: de humedad, compacidad y clasificación de suelos a una profundidad de dos y cinco metros, se realizó un análisis y comparación de resultados geotécnicos obtenidos, con el objetivo de lograr integrar las diferentes propiedades geotécnicas en un solo mapa. Para una mejor visualización e interpretación de los resultados se seleccionaron ciertas propiedades de cada uno de ellos.

A la profundidad de dos metros se tomaron los siguientes parámetros, con el fin de conocer las condiciones del suelo al nivel de desplante para viviendas de uno y dos niveles:

- **Clasificación de suelos:** Según el resultado de la interpolación de la información, los suelos predominantes del área de estudio a esta profundidad son: limos arenosos (ML) con presencia en algunas zonas de arenas limosas, arenas limosas(SM) y arenas(S).
- **Contenido de humedad:** Se observó que no existe una variación considerable entre las humedades de la época seca y lluviosa, por lo que se tomó la decisión de combinar los contenidos de humedad de ambas épocas.

Al revisar la información presentada se denota que hay mayor presencia de contenidos de humedad en un rango de 10-30%, por lo tanto, en el mapa se plasmó las zonas con contenidos de humedad mayor o igual al 30%.



- **N<sub>campo</sub>**: se representó la compacidad de los suelos mediante isolíneas del N<sub>campo</sub> con un valor de 30 golpes.

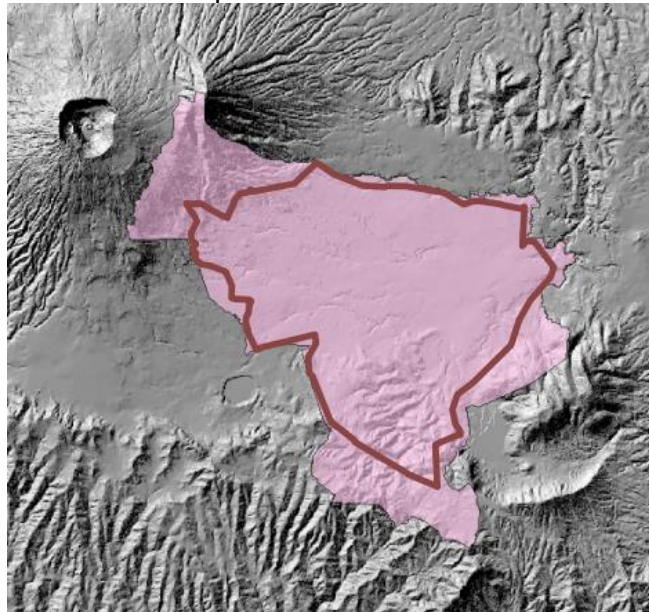
A una profundidad de cinco metros se tomó el parámetro de compacidad de suelos, correspondientes a valores de N<sub>campo</sub> mayores o iguales a 30 golpes, con el fin de conocer las zonas donde se encuentra un estrato denso.

Los componentes que contiene el mapa son:

- **Esquema de localización**

Muestra la ubicación espacial del área de estudio dentro del municipio de San Salvador, ver figura No.3.22.

**Figura No.3. 19** Esquema de ubicación del area de estudio




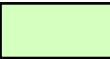


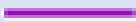




FUENTE: De los autores

- **Leyenda**

En la leyenda se muestra el significado de los símbolos, tramas y colores utilizados para representar los parámetros geotécnicos en el mapa. La leyenda

es la clave para la comprensión e interpretación del mismo. En la tabla No.3.12 se presenta los símbolos del mapa con su respectivo texto explicativo.

**TABLA No. 3. 12** Descripción de leyenda.

<b>CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS A DOS METROS DE PROFUNDIDAD.</b>	
	El color amarillo claro, representa limos arenosos (ML) con presencia en algunas zonas de arenas limosas (SM)
	El color verde claro, representa arenas limosas (SM).
	El color rosado pálido, representa arenas (S).
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD A DOS METROS DE PROFUNDIDAD.</b>	
 W% $\geq$ 30%	Trama en forma de cuadrícula color celeste, representa contenidos de humedad mayores o iguales al 30% a una profundidad de dos metros.
<b>N<sub>campo</sub> A DOS METROS DE PROFUNDIDAD.</b>	
 >30	Isolíneas moradas, representan la resistencia del suelo al ser penetrado por 30 golpes de SPT.
<b>COMPACIDAD DE LOS SUELOS</b>	
 Suelo denso 5m	Trama de líneas paralelas con una inclinación de 45° color rosa, representa la compacidad de los suelos a una profundidad de cinco metros.
<b>DATOS GENERALES</b>	
 Calles y avenidas	Elementos lineales que muestran información sobre las rutas viales de carreteras.
 LIMITE	Polígono color café, representa los puntos frontera de la base de datos.
 PERIMETRO SS	Polígono color rojo, corresponde al perímetro del municipio de San Salvador.

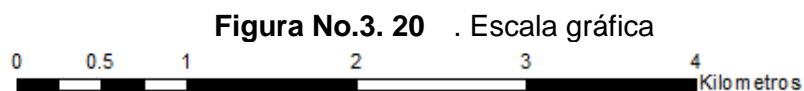
FUENTE: De los autores.

- **Escala numérica**

Ajusta la dimensión real del terreno a la medida del plano, en el mapa aparece la escala 1: 35,000, 1.0 cm. del plano, representa 35,000.0 cm. del terreno o lo que es lo mismo 350.0 m. Al ser una escala mediana, nos permite presentar con más detalle la información.

- **Escala gráfica**

Es el dibujo de la escala numérica indicado en el margen inferior del mapa. Se representa sobre una línea horizontal, dividida en un número determinado de partes iguales, que simbolizan gráficamente la escala 1: 35,000 empleada. La distancia existente entre dos puntos, permite hacer conversiones, trasladando la medida del mapa a esta línea para saber la magnitud real, ver figura No. 3.23.



- **Mapa de sombras**

Se utiliza un mapa de sombras del AMSS para representar el relieve en el mapa.

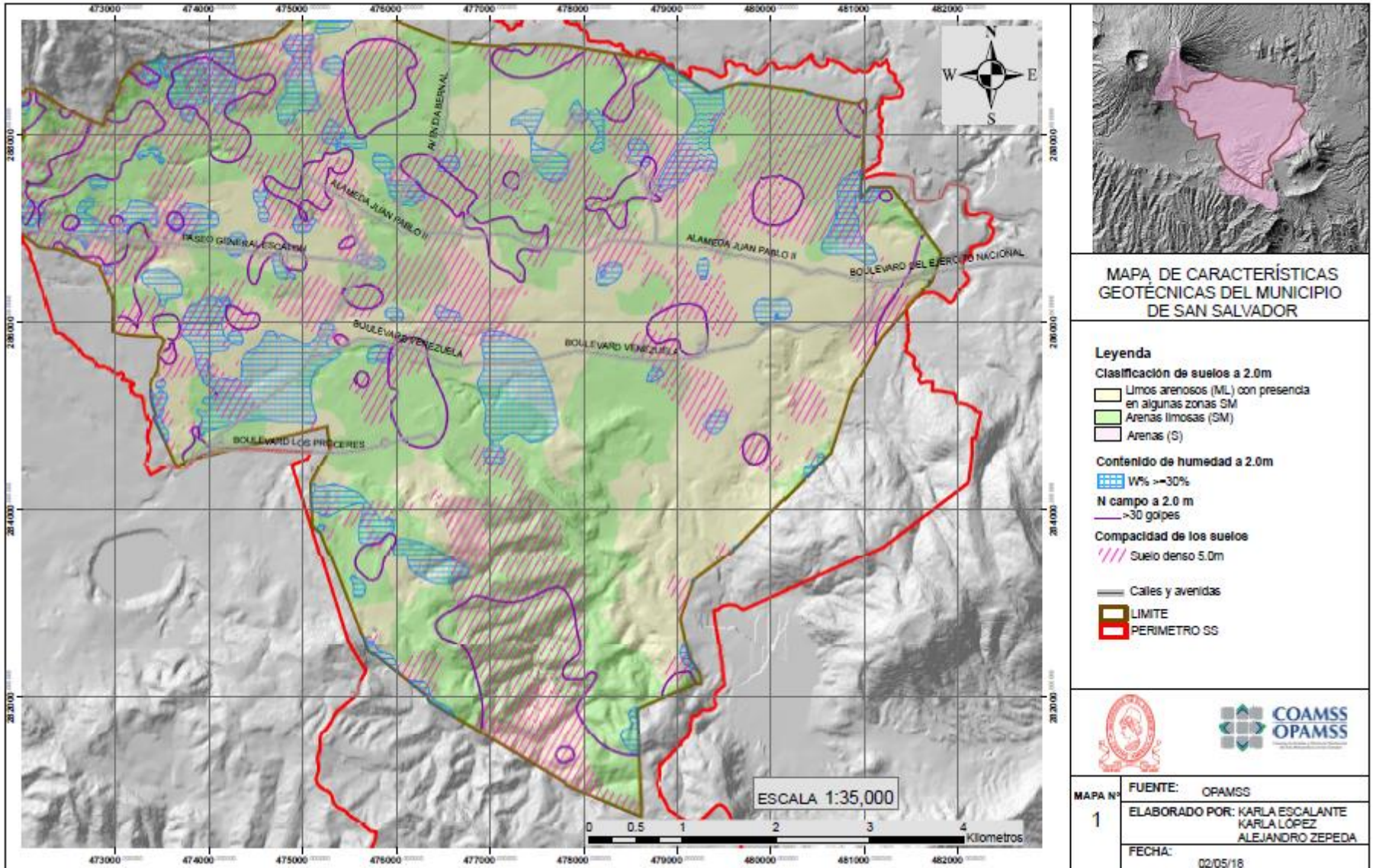
- **Orientación del mapa**

El mapa está orientado de manera que en la parte superior se encuentra el Norte geográfico y de esta manera se pueden ubicar los demás puntos cardinales.

Luego de explicar cada uno de sus componentes, se presenta el mapa final de características geotécnicas del municipio de San Salvador, en la figura No. 3.24.

En el Anexo No.1 se muestra el mapa de características geotécnicas en su escala real.

Figura No.3. 21 Mapa de características geotécnicas del municipio de San Salvador



FUENTE: De los autores.

## **4.0 CAPITULO IV: PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Las cimentaciones son elementos de construcción cuya función principal es la transferencia adecuada de las cargas de las edificaciones al subsuelo. Toda edificación debe cimentarse sobre el terreno de manera apropiada para sus fines de diseño, construcción y funcionamiento, estas en ningún caso deben apoyarse sobre la capa vegetal, rellenos sueltos, materiales degradables o inestables, susceptibles de erosión, socavación o arrastre por aguas subterráneas.

Para realizar el análisis y dimensionamiento de las cimentaciones se deben de conocer las características del terreno de apoyo, las cuales se determinan mediante una serie de actividades que comprende la campaña geotécnica como son: recopilación y análisis de la información disponible, reconocimiento del lugar, investigación exploratoria e investigación detallada cuyos resultados serán reflejados en un estudio geotécnico.

En este capítulo, se estudiarán específicamente los requerimientos mínimos correspondientes al número, espaciamiento y profundidad de sondeos, en edificaciones de tres hasta diez niveles, urbanizaciones y obras de protección, dentro de las obras de protección estudiaremos muros flexibles y la técnica de contención y refuerzo de suelo soil nailing, para esto se realizara una revisión de tres fuentes de información: literaturas geotécnicas, normativas internacionales y



entrevistas a especialistas en el tema, con el fin de desarrollar criterios para establecer los requerimientos mínimos.

## **4.2 EDIFICACIONES**

### **Generalidades**

Un edificio es una construcción realizada por el ser humano, para determinados fines, de diversas dimensiones y formas. A través de la historia, los estilos, materiales y técnicas para la edificación han ido variando, y adaptándose a las necesidades propias de cada época.

Las edificaciones están compuestas por elementos como: muros, vigas, columnas, paredes, sistemas de fundaciones, techos etc., los cuales conforman la estructura del edificio.

Para el buen comportamiento de una edificación se debe tener una cimentación adecuada, la cual sea capaz de garantizar su estabilidad. El tipo de cimentación a utilizar depende de varios factores, siendo los más importantes, las condiciones del subsuelo, y las cargas que debe soportar. Las fundaciones se pueden clasificar en dos grupos: superficiales y profundas. Para las cimentaciones superficiales en la campaña geotécnica se busca determinar el nivel de desplante y la capacidad de carga del estrato firme en el cual las cargas de la estructura se transmiten directamente al terreno situado bajo la misma; en el caso de cimentaciones profundas cuando trabajan por punta se necesita conocer las características de resistencia de los diferentes estratos hasta encontrar uno capaz de resistir las cargas que transmite la superestructura , en el caso que las

cimentaciones profundas trabajen por fricción es necesario conocer las características de rozamiento y adherencia entre suelo y el cuerpo de la cimentación cuando el suelo resistente se encuentra muy profundo.

Algunas normativas geotécnicas definen los lineamientos mínimos (Número, espaciamiento y profundidad de sondeos) en edificaciones según la importancia de la estructura, por lo tanto, la presente investigación, adoptará para este criterio la clasificación establecida por la metodología HAZUS, que categoriza las edificaciones según el número de niveles.

### **Clasificación de edificación según su número de niveles**

Como se dijo, para la determinación de la importancia que puede tener una estructura en nuestro medio, se ha tenido a bien utilizar la metodología estandarizada para la estimación de pérdida por terremoto denominada HAZUS-99 (Advanced Engineering Building module) la que hace una descripción de la magnitud de los daños y pérdidas de 36 tipos de modelos genéricos de edificaciones para grandes grupos de edificios. En la tabla No. 4.1 se presenta la clasificación que realiza esta metodología, con base a modelos estructurales (para evaluar el rendimiento general del edificio) y el número de niveles o altura, lo que permite a partir de estos dos criterios predecir el nivel de riesgos.

**TABLA No. 4.1** Clasificación de los tipos de modelos de edificios según sistema estructural y número de niveles, según HAZUS

No.	ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	ALTURA			
			Rango		Típico	
			Nombre	Pisos	Pisos	Metros
1	W1	Madera, marcos ligeros < 465.0 m <sup>2</sup>		Todos	1	4.5
2	W2	Madera ≥ 465.0 m <sup>2</sup>		Todos	2	7.5
3	S1L	Marcos de acero resistente a momento.	Poca altura	1 - 3	2	7.5
4	S1M		Mediana altura	4 - 7	5	18
5	S1H		Alto	8+	13	46
6	S2L	Estructura de acero con riostras.	Poca altura	1 - 3	2	7.5
7	S2M		Mediana altura	4 - 7	5	18
8	S2H		Alto	8+	13	46
9	S3	Marco de acero ligero.		Todos	1	4.5
10	S4L	Marcos de acero con concreto colado in situ.	Poca altura	1 - 3	2	7.5
11	S4M	Paredes de corte de concreto.	Mediana altura	4 - 7	5	18
12	S4H		Alto	8+	13	46
13	S5L	Marcos de acero sin refuerzo.	Poca altura	1 - 3	2	7.5
14	S5M	Paredes de relleno de mampostería.	Mediana altura	4 - 7	5	18
15	S5H		Alto	8+	13	46
16	C1L	Marcos de concreto resistente a momento.	Poca altura	1 - 3	2	6
17	C1M		Mediana altura	4 - 7	5	15
18	C1H		Alto	8+	12	36
19	C2L	Paredes de corte de concreto.	Poca altura	1 - 3	2	6
20	C2M		Mediana altura	4 - 7	5	15
21	C2H		Alto	8+	12	36
22	C3L	Marcos de concreto sin refuerzo.	Poca altura	1 - 3	2	6
23	C3M	Paredes de relleno de mampostería.	Mediana altura	4 - 7	5	15
24	C3H		Alto	8+	12	36

25	PC1	Muros prefabricados de concreto.		Todos	1	4.5
26	PC2L	Marcos de concreto prefabricados con paredes de corte de concreto.	Poca altura	1 - 3	2	6
27	PC2M		Mediana altura	4 - 7	5	15
28	PC2H		Alto	8+	12	36
29	RM1L	Muros reforzados de mampostería con cubiertas de madera o metal.	Poca altura	1 - 3	2	6
30	RM1M		Mediana altura	4+	5	15
31	RM2L		Poca altura	1 - 3	2	6
32	RM2M	Muros reforzados de mampostería con diafragmas de concreto prefabricado.	Mediana altura	4 - 7	5	15
33	RM2H		Alto	8+	12	36
34	URML	Muros de mampostería no reforzada.	Poca altura	1 - 2	1	4.5
35	URMM		Mediana altura	3+	3	23
36	MH	Casas móviles.		Todos	1	4

FUENTE: Earthquake Loss Estimation Methodology. HAZUS 99

La figura No. 4.1 muestra de manera gráfica la clasificación de las edificaciones de acuerdo al número de niveles según HAZUS.

**Figura No. 4.1** Clasificación de los edificaciones según HAZUS



FUENTE: De los autores.

Como se detalló anteriormente, la presente investigación se limita a estudiar edificaciones de tres a diez niveles, con base a la metodología HAZUS se podría establecer que las edificaciones en estudio tendrían un nivel de riesgo por terremoto: bajo (tres niveles), medio (cuatro a siete niveles) y alto (ocho a diez niveles).

#### 4.2.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA EDIFICACIONES, ESTABLECIDOS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS.

La mayor dificultad que se presenta para establecer estos criterios, es que no existen reglas fijas ni simples para determinar el espaciamiento, cantidad y profundidad de las perforaciones, ya que estas se pueden incrementar o disminuir, dependiendo de la condición del subsuelo y tipo de estructura. Por lo que, a continuación, se detallan lineamientos que pueden servir de referencia para definir estos tres requerimientos en una campaña geotécnica.

##### ✓ **Número y espaciamiento de sondeos**

Generalidades:

Para efectos prácticos la clasificación de los edificios influye sobre la profundidad del reconocimiento, la intensidad del muestreo y el grado de detalle del análisis geotécnico, pero no necesariamente sobre el número de puntos de perforaciones. (Ortiz et al, 1989)

En un planteamiento racional, la densidad de la campaña geotécnica debería adaptarse a la variabilidad del terreno, previsible por los antecedentes de tipo geológico. Sin embargo, esto requiere una experiencia que muy pocos poseen por lo que suele partirse de un programa más o menos genérico el cual se va adaptando y corrigiendo a medida que se van teniendo datos del terreno.

Es imposible determinar el espaciamiento de los sondeos antes de comenzar la investigación, porque depende no solamente del tipo de estructura sino también de la uniformidad y regularidad del depósito de suelo, generalmente se realiza un estimado preliminar del espaciamiento de los sondeos; éste se reduce si se necesitan datos adicionales o se aumenta si el espesor y la profundidad de los diferentes estratos son aproximadamente los mismos en todos los sondeos. El espaciamiento debe ser menor en las áreas que serán sometidas a cargas pesadas y mayor en las áreas menos críticas.

### **Factores fundamentales en la planificación del espaciamiento y número de sondeos.**

Con el objetivo de desarrollar este apartado se presentan las teorías de Ortiz-Gesta-Mazo, Braja Das y adicionalmente se revisó la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993), las cuales indican diferentes factores para determinar el número y espaciamiento entre sondeos.

### Teoría según Ortiz-Gesta-Mazo

Para la planificación del espaciamiento de sondeos existen dos factores fundamentales:

- ✓ Tipo de edificio
- ✓ Variabilidad y naturaleza prevista del terreno

Respecto al primer factor puede considerarse la clasificación de los edificios que aparece en la tabla No. 4.2. La división por cuatro o diez plantas puede parecer arbitraria y, de hecho, es más importante la relación longitud/altura del edificio que el número de plantas, pero se trata solo de una clasificación aproximada en la que el proyectista debe encajar su edificio con cierta libertad en función de las características particulares del mismo.

**TABLA No. 4.2** Clasificación de los edificios según su altura.

TIPO	DESCRIPCIÓN
<b>C-1</b>	Edificios de menos de cuatro plantas (incluyen los sótanos) sin muros de carga, con estructuras isostáticas o muy flexible y perímetros cerrados (cerramientos o paredes) independizados de la deformación de la estructura.
<b>C-2</b>	Edificios de cuatro a diez plantas o que teniendo menos de cuatro plantas no cumplen las condiciones anteriores.
<b>C-3</b>	Edificios de once a veinte plantas
<b>C-4</b>	Edificios de carácter monumental o singular, o con más de veinte plantas. (Serán objeto de un reconocimiento especial, cumpliendo al menos las condiciones que corresponden a C-3).

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición

Separación de sondeos:

Para las distancias máximas de los sondeos, pueden considerarse los valores de  $d_{max}$  que aparecen en la tabla No. 4.3 y que representan las distancias en las que se pueden esperar variaciones significativas en la

naturaleza o propiedades del terreno. En los estudios de nivel reducido, y cuando se requiera efectuar reconocimientos, estos pueden situarse con una densidad del orden  $1/400.0 \text{ m}^2$ .

**TABLA No.4.3** Espaciamiento de sondeo para edificios según clasificación.

TIPO	d (m)	d <sub>o</sub> (m)*
C-1, C-2	d <sub>max</sub>	30
C-3	0.8 d <sub>max</sub>	25
C-4	0.7 d <sub>max</sub>	20

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

\*Siendo d<sub>o</sub> una distancia media a adoptar para el planteamiento inicial de la campaña cuando no se dispone de información sobre el tipo de terreno.

En los estudios de nivel normal y para edificios de los tipos C-1 y C-2 los puntos de reconocimiento deben situarse como máximo a la distancia d<sub>max</sub>, salvo que exceda las dimensiones del terreno y para otros tipos de edificios los puntos se situarán más próximos, tal como lo establece la tabla No. 4.4

**TABLA No. 4.4** Distancias máximas (d<sub>max</sub>) en metros para la ubicación de los sondeos.

TIPO DE TERRENO	DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	TIPOS DE EDIFICIOS			
		C-1	C-2	C-3	C-4
T-0	Terrenos de naturaleza desconocida o de los que no se tiene información.	30	30	25	25
T-1	<b>Terrenos de variabilidad baja</b>				
	1. Sedimentos finos consolidados (margas, arcillas limos, etc.) con relieve suela y en grandes espesores.	60	50	45	40
	2. Vegas y terrazas de grandes ríos en curso medio o bajo.	40	35	30	25
	3. Maristas y albuferas	40	35	30	25
	4. Rocas blandas sedimentarias (areniscas, argilitas, etc.)	50	45	40	35
	5. Depósitos granulares gruesos no fluviales, con finos.	45	40	35	30
T-2	<b>Terrenos de variabilidad media</b>				
	1. Deltas y estuarios de grandes ríos	35	35	30	25
	2. Depósitos costeros eólicos, dunas	30	30	25	20
	3. Formaciones encostradas, caliches	25	25	25	20
	4. Depósitos de piedra de ladera, salida de barrancos.	30	30	25	20



	5. Suelos residuales sobre granitos o calizas en la periferia peninsular	35	35	30	25
	6. Suelos residuales sobre esquistos y otras rocas.	30	30	25	25
	7. Coladas basálticas antiguas	30	25	25	20
	8. Rocas bandas no estratificadas	25	25	20	20
	<b>Terrenos de variabilidad alta o potencialmente problemática</b>				
	1. Cauces, terrazas y deltas de ríos torrenciales.	20	20	15	15
	2. Antiguas llanuras de inundación de ríos divagantes (con meandros)	25	25	20	20
<b>T-3</b>	3. Morrenas y depósitos glaciares	25	25	20	20
	4. Alternancias de gravas y suelos finos en laderas suaves no fluviales.	25	25	20	20
	5. Terrenos yesíferos	20	20	15	15
	6. Suelos residuales sobre granitos o calizas en la Meseta.	25	20	20	15
	7. Calizas con eventuales problema de disolución. (Karst)	30	25	25	20
	8. Terrenos volcánicos	25	20	20	15

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

Número de sondeos:

Una campaña geotécnica comprenderá como mínimo tres sondeos.

Cuando de las prescripciones anteriores resulte un número mayor y el terreno lo haga aconsejable o admisible, los sondeos se pueden substituir por penetrómetros o pozos a cielo abierto, en los porcentajes máximos que se detallan en la tabla No. 4.5.

**TABLA No. 4.5** Porcentaje de sustitución de sondeos por penetrómetros o pozos a cielo abierto.

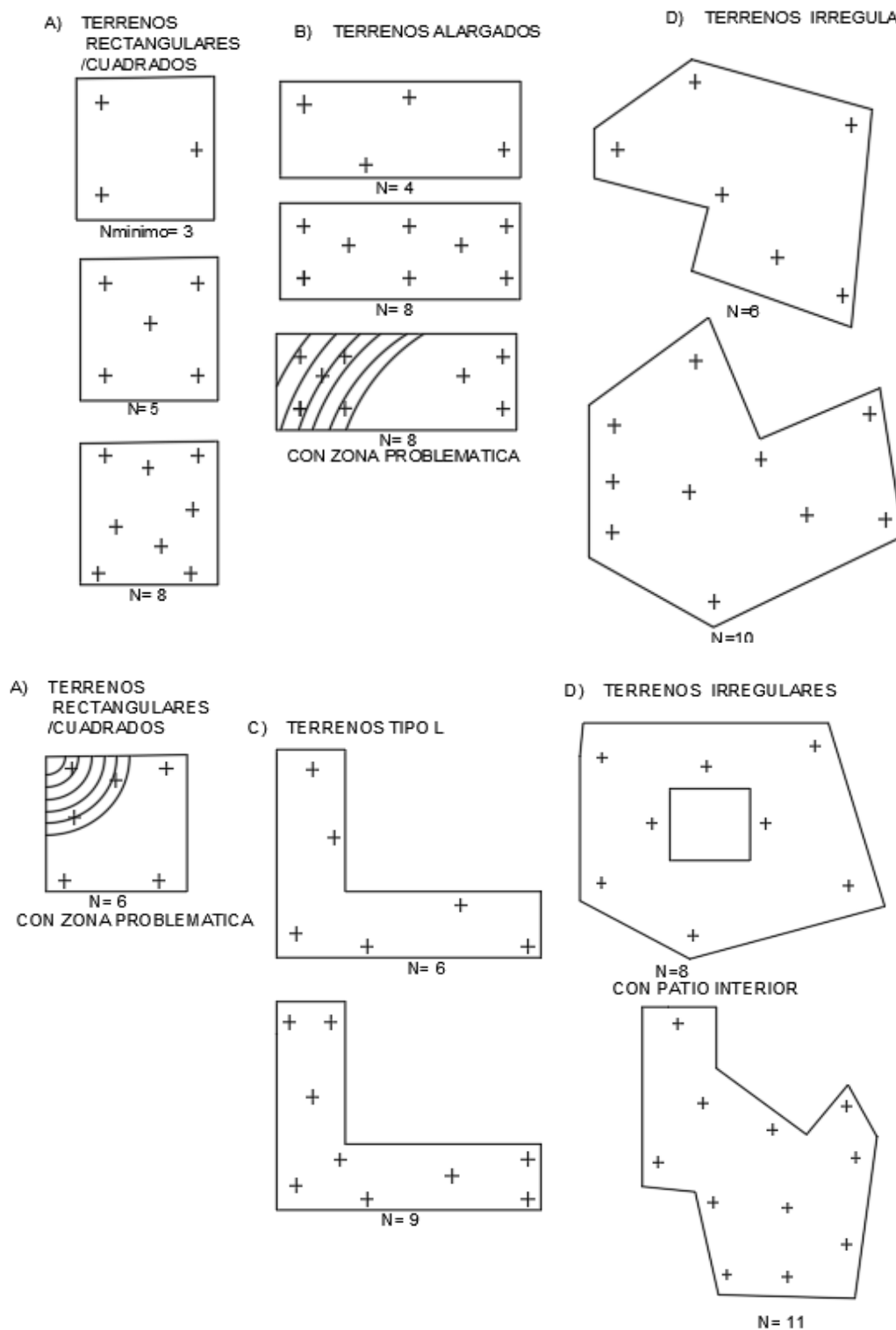
TIPO DE TERRENO	% DE SUSTITUCIÓN
<b>T-1</b>	70
<b>T-2</b>	50
<b>T-3</b>	30

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

#### Ubicación de sondeos:

Las perforaciones deben situarse según esquemas regulares, eventualmente concentrándolos en zonas conflictivas. Conviene cubrir bien el perímetro del terreno, con las distancias al mismo no superiores a unos 3.0 m, progresando hacia el interior. Como ejemplo se muestran los esquemas en la figura No. 4.2.

**Figura No. 4.2** Esquema de distribución de sondeos según la forma del terreno.



FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

En el caso de estudios de suelo para edificios próximos a construir simultáneamente, se puede aprovechar la experiencia acumulada para reducir la densidad de sondeos, y así extender la información puntual a varios edificios adyacentes siempre que estos se encuentren a una distancia igual o inferior a la indicada en la tabla No. 4.4.

### Teoría según Braja Das

Esta teoría indica algunas directrices generales para definir el espaciamiento de las perforaciones, según el tipo de proyecto, como se muestra en la tabla No. 4.6, además se debe tomar en cuenta que, si varios estratos del suelo son más o menos uniformes y predecibles, se necesitarán menos perforaciones que en estratos de suelo no homogéneos.

**TABLA No. 4.6** Espaciamientos mínimos según tipo de proyecto

TIPO DE PROYECTO	ESPACIAMIENTO (m)
Edificios de muchos pisos	10.0 – 30.0
Plantas industriales de un piso	20.0 – 60.0
Carreteras	250.0 – 500.0
Subdivisión residencial	250.0 – 500.0
Presas y diques	40.0 – 80.0

FUENTE: Braja Das. (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.

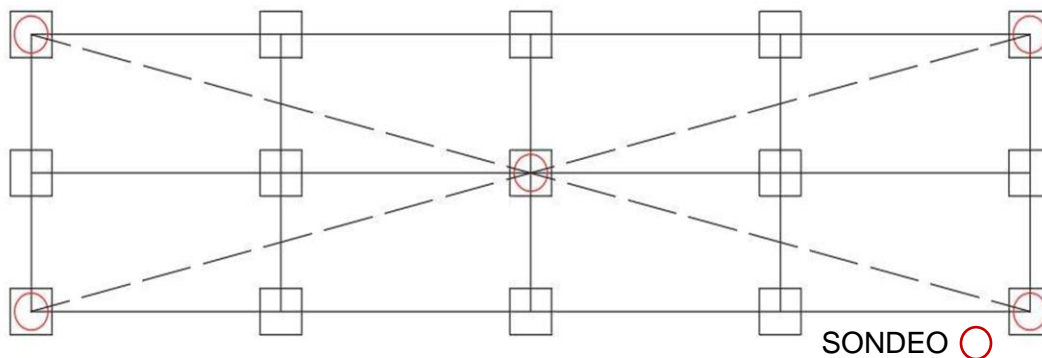
Al proseguir el programa de exploración, el ingeniero debe estudiar las consecuencias que pueda tener toda nueva información. Si se necesitan sondeos adicionales especiales, deberán localizarse y planificarse, de manera que cada adición al programa proporcione el máximo de conocimientos en esa etapa de la investigación.

**“Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993)**

Esta literatura utiliza dos criterios para el número y espaciamiento de los sondeos para edificios de dos a seis niveles:

- ✓ **Tipo de cimentación:** se realizará una aproximación como si la cimentación de la estructura fuera a base de zapatas aisladas; y se hará el número de perforaciones con base al número de zapatas. Se puede hacer un sondeo por cada tres a cinco zapatas, en ningún caso el número de perforaciones será menor de cuatro, para definir los perfiles estratigráficos. En función de este criterio, se podría tener una distribución según se muestra en la figura No. 4.3.

**Figura No. 4.3** Distribución de sondeos con base al número de zapatas.



FUENTE: Calderón et al, (1993). “Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil”, Universidad de El Salvador.

- ✓ **Dimensiones (área del edificio):** para edificios con área de construcción menores de 250.0 m<sup>2</sup>, el número de sondeos es de cuatro o cinco; para edificios de áreas medianas entre 250.0 m<sup>2</sup> a

1000.0 m<sup>2</sup> implica por lo menos cinco sondeos, finalmente para áreas mayores a 1000.0 m<sup>2</sup> se puede estimar para condiciones regulares del terreno, un sondeo por cada 200.0 m<sup>2</sup> (estos criterios son independientes del tipo de suelo). La aplicación de este criterio se puede ver en la tabla No. 4.7.

**TABLA No. 4.7** Criterios para definir el número de sondeos basado en el área del edificio.

ÁREA (m <sup>2</sup> )	NÚMERO DE SONDEOS
< 250.0	4 a 5
250.0 a 1000.0	Por lo menos 5
>1000.0	un sondeo por cada 200.0 m <sup>2</sup>

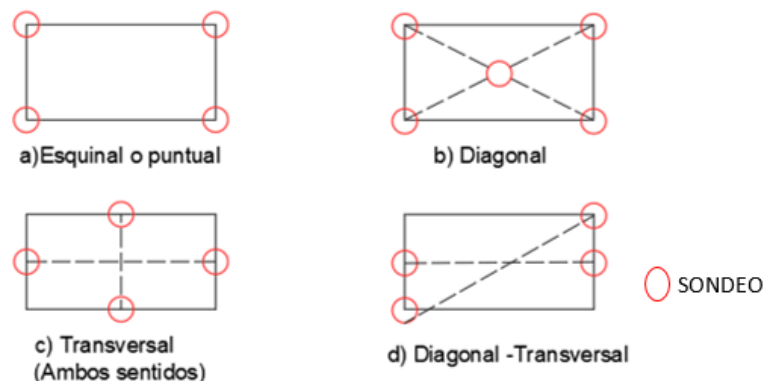
FUENTE: Calderón et al, (1993). "Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil", Universidad de El Salvador.

Ubicación de sondeos:

Para la distribución de los sondeos, esta se define según el tamaño del área del edificio:

- ✓ Para áreas menores o iguales a 250.0 m<sup>2</sup> , su distribución se muestra en la figura No.4.4

**Figura No. 4.4** Distribución de sondeos para edificios con áreas menores o iguales a 250.0 m<sup>2</sup>



FUENTE: Calderón et al, (1993). "Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil", Universidad de El Salvador.

- ✓ Para áreas mayores de 250.0 m<sup>2</sup> la variación es muy amplia, quedando a criterio del ingeniero geotecnista la distribución de los sondeos.

✓ **Profundidad de exploración**

La profundidad de perforación debe proporcionar información necesaria para poder predecir la profundidad de apoyo de la edificación así como el asentamiento de la estructura, los sondeos deben penetrar todos los estratos que puedan consolidarse notablemente por efecto de las cargas; para cumplir este objetivo, en el siguiente apartado se presentan las teorías: Ortiz-Gesta-Mazo, Peck et al, Braja Das y la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993).

**Teoría según Ortiz-Gesta-Mazo**

Para la planificación preliminar de la campaña pueden adoptarse las profundidades medias indicadas en la tabla No. 4.8, considerando el tipo de edificio según su altura y la variabilidad del terreno.

**TABLA No. 4.8** Profundidades orientativas para la planificación preliminar de las perforaciones.

SITUACIÓN	TIPO DE EDIFICIO	PROFUNDIDAD (m)
a) Laderas de montaña o terrenos de relieve suave sobre formaciones consolidadas o rocosas. Valles fluviales en zonas altas de ríos. Zonas urbanas tradicionalmente con cimentaciones directas.	C-1	10
	C-2	12
	C-3	14
	C-4	16
b) Llanuras y valles de ríos importantes. Zonas urbanas de nueva ocupación	C-1	12
	C-2	15
	C-3	18
	C-4	20
c) Zonas de deltas, marismas o albuferas antiguas	C-1	15

Tramos finales de ríos importantes.	C-2	20
Nueva ocupación de zonas urbanas o industriales antiguas.	C-3	25
Zonas tradicionalmente con cimentación profunda.	C-4	30

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

Aunque el programa debe elaborarse de manera que proporcione la información necesaria para la obra en cuestión, el ingeniero debe tomar en cuenta la posibilidad de que puede haber cambios en las distribuciones estructurales preliminares, incluyendo la separación de las columnas y las cargas. La exploración no debe limitarse a obtener la información necesaria para el tipo de cimentación que el ingeniero pensaba inicialmente como el más adecuado; pues de lo contrario, puede faltarle información para elegir o proyectar otro tipo que pueda resultar más práctico o económico.

### **Teoría según Peck, et al.**

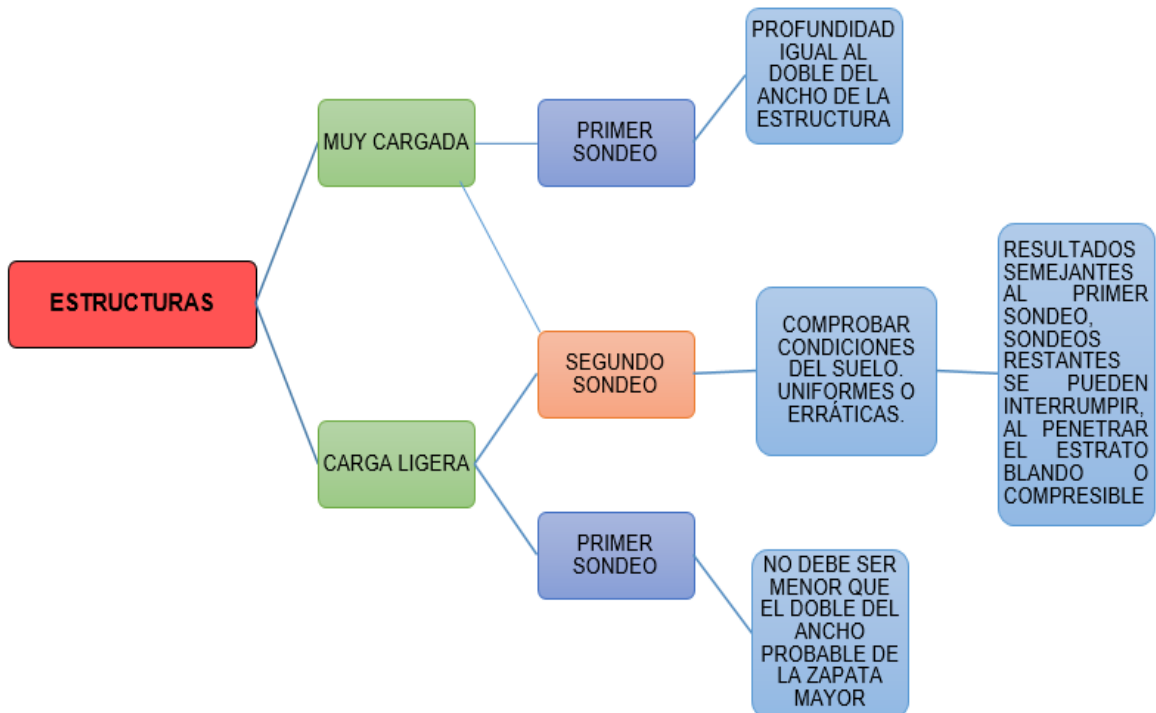
Para los edificios o estructuras de tamaño ordinario, es conveniente realizar cuatro sondeos, uno en cada esquina de la estructura. A menos que se encuentre un manto de roca, el primer sondeo ordinariamente debe prolongarse a la máxima profundidad dentro de la cual el esfuerzo producido por la estructura pueda todavía influir en los asentamientos. Esta profundidad puede haberse determinado basándose en los cálculos aproximados del esfuerzo y del asentamiento.

En una estructura muy cargada, el primer sondeo debe prolongarse ordinariamente hasta una profundidad igual al doble del ancho de la



estructura. Debajo de una estructura con carga ligera con columnas muy separadas, la profundidad del primer sondeo no debe ser menor que el doble del ancho probable de la zapata mayor. El segundo sondeo sirve para comprobar si las condiciones del suelo son uniformes o erráticas. Si los resultados son semejantes a los del primer sondeo, los sondeos subsecuentes pueden interrumpirse ordinariamente, cuando han penetrado todo el estrato blando o compresible. La figura No. 4.5 muestra un resumen de lo anteriormente descrito.

**Figura No.4.5** Esquema resumen del planteamiento de Ralph B. Peck en su libro de Ingeniería de cimentaciones.



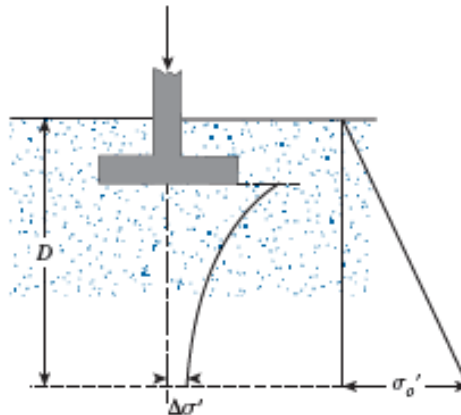
FUENTE: De los autores

### Teoría según Braja Das

La profundidad mínima aproximada requerida de los sondeos se puede cambiar durante la operación de perforación, dependiendo del subsuelo encontrado. Para determinar la profundidad mínima aproximada de perforación, el autor retoma lo que establece la American Society of Civil Engineers (1972):

- A. Primero se determina el incremento en el esfuerzo efectivo,  $\Delta\sigma'$ , bajo una cimentación con la profundidad, como se muestra en la figura No. 4.6. Para esto se emplea el principio de Boussinesq, el cual se detalla a continuación.

**Figura No. 4.6** Determinación de la profundidad mínima de exploración.

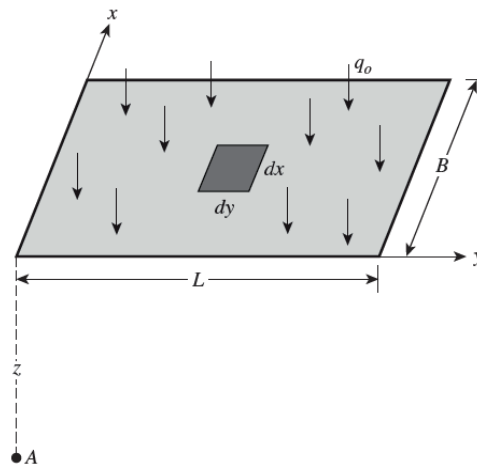


FUENTE: Braja Das. (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.

### Esfuerzo debajo de un área rectangular (Principio de Boussinesq)

La técnica de integración de la ecuación de Boussinesq permite que se evalúe el esfuerzo vertical en cualquier punto A debajo de una esquina de un área flexible rectangular cargada, como se muestra en la figura No. 4.7.

**Figura No. 4.7** Determinación del esfuerzo debajo de una esquina de un área flexible rectangular cargada.



FUENTE: Braja Das. (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.

Para determinar el esfuerzo a una profundidad  $z$  debajo del punto  $o$ , se divide el área cargada en cuatro rectángulos, con "O" como la esquina común para cada rectángulo, ver figura No. 4.8. El incremento total del esfuerzo ocasionado por toda el área cargada se puede expresar como:

$$\Delta\sigma' = q_o (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

Dónde:

$$I = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2*n^2+1} * \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2} \right),$$

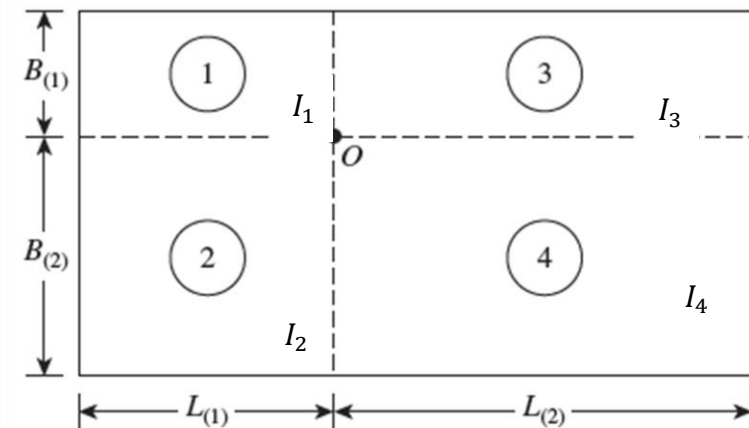
(Factor de influencia)

$$m = \frac{B}{z}$$

$$n = \frac{L}{z}$$

$q_o$  = Esfuerzo de contacto (esfuerzo a transmitir)

**Figura No. 4.8** Determinación del esfuerzo debajo de cualquier punto de un área rectangular flexible cargada.



FUENTE: Braja Das. (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.

- B. Estimar la variación del esfuerzo vertical,  $\sigma'_0$ , con la profundidad, como se muestra en la figura No. 4.6.

Con base a los dos planteamientos previamente descritos, se utilizará la siguiente terminología:

D: Profundidad que se muestra en la figura No.4.6

$\Delta\sigma'_0$  : incremento del esfuerzo efectivo

$q_o$  : esfuerzo de contacto (esfuerzo a transmitir)

Donde se evalúa lo siguiente:

- Determinar la profundidad D, en la que el incremento del esfuerzo efectivo ( $\Delta\sigma'_0$ ) es igual a  $(1/10) q_o$ .

### Según Sowers y Sowers, (1970)

Otro punto de vista para determinar las profundidades de perforación para un edificio con un ancho de 30.0 m, será aproximadamente como se muestra en la tabla No. 4.9.

**TABLA No. 4.9** Profundidades mínimas de perforación según Sowers y Sowers para edificio de 30.0 m de ancho.

NÚMERO DE PISOS	PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN
1	3.5 m
2	6.0 m
3	10.0 m
4	16.0 m
5	24.0 m

FUENTE: Braja Das. (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.

Sowers y Sowers define una regla simple para relacionar la profundidad aproximada de los sondeos ( $D$ ), con el número de niveles ( $S$ ), para estructuras como hospitales y edificios de oficina, tal como se describe a continuación:

- ✓ Para estructuras ligeras:  $D = 3 * S^{0.7}$
- ✓ Para estructuras pesadas:  $D = 6 * S^{0.7}$

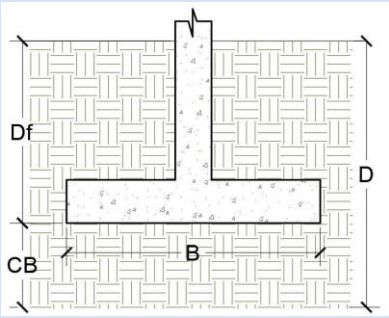
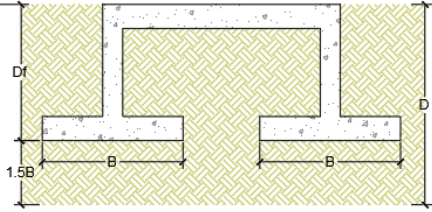
Se debe tomar en cuenta que, cuando se anticipen excavaciones profundas, la profundidad de perforación debe ser al menos de 1.5 veces la profundidad de excavación.

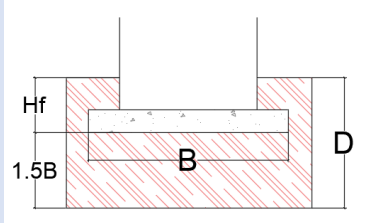
**“Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993)**

Para definir la profundidad a explorar en las edificaciones, se utilizan según esta guía tres criterios: Tipo de cimentación, número de pisos y los esfuerzos transmitidos al suelo.

- Tipo de cimentación: Define la profundidad a explorar según el tipo de cimentación, tal como se muestra en la tabla No.4.10.

**TABLA No. 4.10** Profundidad mínima a explorar según tipo de cimentación.

TIPO DE CIMENTACIÓN	PROFUNDIDAD DE SONDEO
<p style="text-align: center;"><b>Zapara aislada</b></p> 	$D = C * B + D_f$ <p>Dónde:</p> <p>D= Profundidad de sondeo en metros  C= 1.5 en condiciones normales de carga y 2.0 cuando existan concentraciones de carga.  B= Ancho de zapata  D<sub>f</sub> = Profundidad estimada de desplante de la cimentación de 2.0 m a 3.0 m.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Zapata corrida</b></p> 	$D = 1.5B + D_f$ <p>Dónde:</p> <p>D= Profundidad de sondeo en metros  B= Ancho de zapata  D<sub>f</sub> = Profundidad estimada de desplante de la cimentación de 2.0 m a 3.0 m.</p>

<p style="text-align: center;">Losas de cimentación</p> 	$D = 1.5B + D_f$ <p>Dónde:</p> <p>D= Profundidad de sondeo en metros          B= Ancho de zapata          D<sub>f</sub> = Profundidad estimada de desplante de la cimentación de 2.0 m a 3.0 m.</p>
---	---

FUENTE: Calderón et al, (1993). "Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil", Universidad de El Salvador.

- Esfuerzo transmitido: Este se define con base a dos condiciones:

Para  $B \leq 2l$

$$D = 0.8p * B + D_f$$

Dónde:

D= profundidad de sondeos en metros.

p=peso del edificio entre el área.

B= ancho del edificio

D<sub>f</sub> = profundidad estimada de desplante de la cimentación de 2.0 m a 3.0 m.

l =largo del edificio

Para  $B > 2l$

$$D = p * B + D_f$$

Dónde:

D= profundidad de sondeos en metros.

p= 1.0 kg/cm<sup>2</sup> a 3.0 kg/cm<sup>2</sup>.

$B$  = ancho del edificio

$D_f$  = profundidad estimada de desplante de la cimentación de 2.0 m a 3.0 m.

Las fórmulas anteriores, establecen la profundidad mínima de los sondeos, para la transmisión de esfuerzos de la cimentación del edificio; quedando a criterio del ingeniero de campo, aumentar o disminuir esta profundidad.

- Número de niveles: el peso de una estructura se refleja en el número de niveles del edificio; siendo también la altura (número de niveles) un criterio para establecer la profundidad de los sondeos. La tabla No.4.11 muestra la profundidad de sondeos en edificaciones según el número de niveles.

**TABLA No. 4.11** Profundidad mínima a explorar según número de niveles.

NIVEL	PROFUNDIDAD MÍNIMA DE SONDEOS (m)
<3	4.0
3-8	8.0
>8	15.0

FUENTE: Calderón et al, (1993). "Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil", Universidad de El Salvador.

### **Profundidad a explorar en estrato rocoso, según Ralph B. Peck, y Braja Das.**

Cuando los sondeos se encuentran en roca o que las condiciones del subsuelo requieren que la carga de la cimentación se transmita a un lecho rocoso, se establece una profundidad mínima a explorar para verificar que se cimente en roca sana, la cual se muestra en la tabla No. 4.12.



**TABLA No. 4.12** Profundidades mínimas a explorar en un manto rocoso.

TEORIA	PROFUNDIDAD MÍNIMA EXPLORAR EN ROCA
Ralph B. Peck, Ingeniería De Cimentaciones	Deberán obtenerse muestras de una profundidad de 1.5 a 3.0 m para asegurarse de que se trata de un manto de roca sana, y no de un boleó o pedazo de roca desprendido. Si existe la evidencia de que haya canales de disolución o de meteorización profunda, usualmente la extracción de los núcleos deben continuarse dentro de la roca sana.
Braja Das, Fundamentos De Ingeniería De Cimentaciones, Séptima Edición	La profundidad mínima de perforación para la extracción de núcleos en el lecho de la roca es de aproximadamente 3.0 m. Si el lecho de roca es irregular o esta intemperado, la perforación para la extracción de núcleos puede ser más profunda.

FUENTE: De los autores.

**Profundidad a explorar para verificar el estrato resistente (Ortiz et al, 1989)**

Los sondeos deben alcanzar un estrato firme de suficiente espesor, penetrando en el mismo:

$$d_{sf} \geq 2 + 0.3p \text{ (m)},$$

Dónde:

$p$ : el número de plantas del edificio.

En el caso de un estrato rocoso bastará con penetrar  $d_{sf}$  en el 30% de los sondeos y un mínimo de 2.0 m en el resto, si bien cuando el terreno sea conocido y se excluya la existencia de bloques erráticos, boleos, etc. puede admitirse terminar los sondeos al llegar a la roca. (Ortiz et al, 1989)

Cuando los dos primeros sondeos realizados en una determinada zona o terreno indiquen que se tratan de depósitos en los que no se alcanza el estrato firme dentro de una profundidad razonable ( $\leq 30.0 \text{ m}$ ), los sondeos restantes pueden terminarse a la mayor de las profundidades indicadas en la tabla No. 4.13.

**TABLA No. 4.13** Profundidad de los reconocimientos\* (Estrato firme muy profundo)

RESISTENCIA DEL TERRENO	EDIFICIO	PROFUNDIDAD
Muy baja $N < 10$ , $q_u < 0.8 \text{ kg/cm}^2$	C-1	1.3b
	C-2	1.4b $4p^{0.7}$
	C-3	1.5b
	C-4	1.6b
Baja $10 \leq N \leq 20$ , $0.8 \leq q_u \leq 1.5 \text{ kg/cm}^2$	C-1	1.1b
	C-2	1.2b $4p^{0.6}$
	C-3	1.3b
	C-4	1.4b
Muy baja ( $N > 20$ , $q_u > 1.5 \text{ kg/cm}^2$ )	C-1	b
	C-2	b $4p^{0.5}$
	C-3	1.1b
	C-4	1.2b

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado De Cimentaciones, Cuarta Edición.

\*p= número de plantas, sin contar sótanos

b= dimensión menor del edificio (definida como el cociente entre la superficie edificada y la mayor distancia entre los puntos medios del perímetro cerrado opuestos)

A continuación, se presenta en la tabla resumen No. 4.14 todos los requerimientos mínimos anteriormente planteados por las diferentes literaturas geotécnicas, con el objetivo de poder realizar una comparación entre ellos, y posteriormente realizar su respectivo análisis.

**TABLA No.4.14** Resumen de requerimientos mínimos para edificaciones.

ORTIZ-GESTA-MAZO (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, CUARTA EDICIÓN.				
NIVELES	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m) Rangos que depende del terreno T-1	PROFUNDIDAD (m)	
<4	3	40.0 – 60.0	10.0	Terrenos de relieve suave
4 -10		35.0 – 50.0	12.0	
11-20		25.0 – 35.0	14.0	
>20		25.0 – 40.0	16.0	

NIVELES	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m) Rangos que depende del terreno T-2	PROFUNDIDAD (m)
<4	3	25.0 - 35.0	12.0
4 -10		25.0 - 35.0	15.0
11 - 20		20.0 - 30.0	18.0
>20		20.0 - 25.0	20.0
Zonas urbanas de nueva ocupación			
NIVELES	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m) Rangos que depende del terreno T-3	PROFUNDIDAD (m)
<4	3	20.0 - 30.0	15.0
4 -10		20.0 - 25.0	20.0
11-20		15.0 - 25.0	25.0
>20		15.0 - 20.0	30.0
Zonas tradicionalmente con cimentación profunda.			
<b>BRAJA DAS (2010). FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES, SÉPTIMA EDICIÓN</b>			
NIVELES	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Edificios de muchos pisos	No define	10.0 – 30.0	$\Delta\sigma'_0 = 1/10 q_o$
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
2 a 6 Niveles	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
3 - 5 Zapatas	1 (En ningún caso el número de perforaciones será menor a cuatro)	No define	Depende del tipo de fundación: zapata aislada, corrida y losa de cimentación.
AREA DEL EDIFICIO	NÚMERO		No define
< 250.0 m <sup>2</sup>	4 a 5		
250.0 m <sup>2</sup> a 1000.0 m <sup>2</sup>	Por lo menos 5		
>1000 m <sup>2</sup>	Un sondeo por cada 200.0 m <sup>2</sup>		
NÚMERO DE NIVELES	NÚMERO		PROFUNDIDAD (m)
<3	No define		4.0
3 - 8		8.0	
>8		15.0	
Esfuerzo transmitido		PROFUNDIDAD (m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para <math>B \leq 2 l</math></li> <li><math>D = 0.8p * B + D_f</math></li> </ul>

RALPH B. PECK, INGENIERÍA DE CIMENTACIONES			
PESO ESTRUCTURA	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Estructura cargada	2	No define	S1-profundidad se toma como 2 veces el ancho de la estructura.
Estructura ligera			S2-comprobar condiciones del suelo.
S1-profundidad > 2 veces ancho de estructura.			
S2-comprobar condiciones del suelo			
SOWER Y SOWERS, INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS Y CIMENTACIONES			
Peso estructura	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Estructuras pesadas	No define	No define	$D = 6 * S^{0.7}$
Estructura ligera			$D = 3 * S^{0.7}$
PROFUNDIDAD DEL ESTRATO ROCOSO			
TEORÍA	RALPH B. PECK	BRAJA DAS	
PROFUNDIDAD (m)	1.5 - 3.0	3.0	

FUENTE: De los autores.

#### 4.2.2 LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS INTERNACIONALES

- **Norma técnica ecuatoriana (2014)**

Esta norma define las unidades de construcción (baja, media, alta y especial) en función del número de niveles y las cargas máximas de servicio transmitidas, de tal forma que con esta información se determine el número mínimo y profundidad de los sondeos.

#### **Clasificación de las unidades de construcción por categorías**

Para la clasificación de edificaciones según esta normativa se asignará la categoría más desfavorable que resulte de la tabla No. 4.15.

**TABLA No. 4.15** Clasificación de las unidades de construcción por categorías.

CLASIFICACIÓN	SEGÚN LOS NIVELES DE CONSTRUCCIÓN	SEGÚN LAS CARGAS MÁX. DE SERVICIO EN COLUMNAS (KN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800.0
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801.0 – 4000.0
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4001.0 – 8000.0
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8000.0

FUENTE: Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC). (2014). Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

Número mínimo de sondeos

Luego de definir la clasificación de la unidad de construcción, con base a la tabla No. 4.16 se establece el número mínimo de sondeos de exploración que deberán efectuarse en el terreno donde se desarrollará el proyecto.

**TABLA No. 4.16** Número mínimo de sondeos y profundidad por cada unidad de construcción.

CATEGORIA DE LA UNIDAD DE CONSTRUCCIÓN			
BAJA	MEDIA	ALTA	ESPECIAL
Profundidad Mínima: 6.0 m	Profundidad Mínima: 15.0 m	Profundidad Mínima: 25.0 m	Profundidad Mínima: 30.0 m
Número mínimo de sondeos: 3	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 4	Número mínimo de sondeos: 5

FUENTE: Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC). (2014). Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

En cuanto a la profundidad de los sondeos la normativa establece que por lo menos el 50% de todos los sondeos deben alcanzar la mayor profundidad establecidas en la tabla No. 4.16, además se debe tomar en cuenta los criterios definidos en la tabla No. 4.17:

**TABLA No. 4.17** Profundidad mínima de los sondeos de acuerdo al tipo de cimentación.

<b>TIPO DE LA OBRA CIVIL SUBTERRANEA</b>	<b>PROFUNDIDAD DE LOS SONDEOS</b>
<b>Losa corrida</b>	1.5 veces el ancho
<b>Zapata</b>	2.5 veces el ancho de la zapata de mayor dimensión.
<b>Pilotes</b>	Longitud total del pilote más largo más 4 veces el diámetro del pilote.
<b>Grupo de pilotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud total del pilote más largo, más 2 veces el ancho del grupo de pilotes.</li> <li>• 2.5 veces el ancho del cabezal de mayor dimensión.</li> </ul>
<b>Excavaciones</b>	Mínimo 1.5 veces la profundidad de excavación a menos que el criterio del ingeniero geotécnico señale una profundidad mayor según requerimiento del tipo de suelo.
<b>Caso particular, roca firme</b>	<p>En los casos donde se encuentre roca firme, o aglomerados rocosos o capas de suelos firmes asimilables a rocas, a profundidades inferiores a las establecidas, el 50% de los sondeos deberán alcanzar las siguientes penetraciones en material firme, de acuerdo con la categoría de la unidad de construcción:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Categoría baja: los sondeos pueden suspenderse al llegar a estos materiales;</li> <li>• Categoría Media, penetrar un mínimo de 2.0 m en dichos materiales, o dos veces el diámetro de los pilotes en estos apoyados.</li> <li>• Categoría Alta y Especial, penetrar un mínimo de 4.0 m o 2.5 veces el diámetro de pilotes respectivos, siempre y cuando se verifique la continuidad de la capa o la consistencia adecuada de los materiales y su consistencia con el marco geológico local.</li> </ul>

FUENTE: Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC). (2014). Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI).

- **Norma tecnológica de cimentaciones de España (NTE-CEG) (1975).**

La Norma Tecnológica de Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG) realiza su planteamiento con base a una categoría de campaña geotécnica y a una clasificación del tipo de estructura según su modulación media entre apoyos y del número de plantas (incluidos sótanos), estableciendo así la cantidad de sondeos a realizar.

La tabla No.4.18 describe cada una de las categorías de las campañas geotécnicas, según las condiciones particulares del proyecto.

**TABLA No. 4.18** Tipos de categorías de campañas geotécnicas.

<b>CATEGORÍA DE CAMPAÑA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Campaña de categoría I (CEG-1)</b>	<p>Supone que las características del terreno a explorar son iguales a la de los terrenos colindantes edificados. Sera de aplicación cuando se cumplan simultáneamente los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No existe en los terrenos colindantes grandes irregularidades como fallas o estratos erráticos.</li> <li>• Existen edificaciones situadas a menos de 50.0 m del terreno a edificar y no presentan anomalías como grietas o desplomes originados por movimientos en el terreno.</li> <li>• El tipo de edificio a cimentar es el mismo que el de las edificaciones situadas a menos de 50.0 m.</li> <li>• El número de plantas de edificio a cimentar, incluidos sótanos, la modulación media entre apoyos y las cargas en estos, son iguales o inferiores que las correspondientes a las edificaciones situadas a menos de 50.0 m.</li> <li>• Las cimentaciones de los edificios situados a menos de 50.0 m y la prevista para el edificio a cimentar son de tipo superficial, excepto losa.</li> <li>• La cimentación prevista para el edificio no profundiza respecto de las contiguas en más de 1.5 m</li> </ul>
<b>Campaña de categoría II (CEG-2)</b>	<p>Sera de aplicación cuando no haya precedentes en la zona de la existencia de grandes irregularidades como fallas o estratos erráticos y se cumpla alguno de los siguientes puntos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen edificaciones situadas a menos de 50.0 m del terreno a edificar o existen, pero presentan anomalías como grietas o desplomes originados por movimientos en el terreno.</li> <li>• El tipo de edificio a cimentar es diferente que el de las edificaciones situadas a menos de 50.0 m.</li> <li>• El número de plantas de edificio a cimentar, incluidos sótanos, la modulación media entre apoyos y las cargas en estos, son mayores que las correspondientes a las edificaciones situadas a menos de 50.0 m.</li> <li>• Las cimentaciones de los edificios situados a menos de 50.0 m son por losa o por pilote.</li> <li>• La cimentación de los edificios situados a menos de 50.0 m y la prevista para el edificio a cimentar son de tipo superficial excepto por losa y esta última profundiza respecto de las próximas en más de 1.5 m.</li> </ul>
<b>Campaña de categoría III (CEG-3)</b>	Condiciones similares a categoría II
<b>Campaña de categoría IV (CEG-4)</b>	Sera de aplicación cuando haya precedentes en la zona de la existencia de grandes irregularidades bajo el plano de apoyo probable de la cimentación.

FUENTE: Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG). (1975).  
Ministerio de la Vivienda, España.

En la tabla No. 4.19 se define la cantidad de sondeos a realizar según la categoría de campaña geotécnica, a excepción del tipo de campaña de categoría I, donde adicionalmente requiere el uso de la tabla No. 4.20 para definir dicho parámetro geotécnico.

**TABLA No. 4.19** Cantidad de sondeos a realizar según la categoría de campaña geotécnica.

TIPOS DE CAMPAÑA	CANTIDAD DE SONDEOS		
	Tipo de edificio	Número de puntos a reconocer	
Campaña de categoría I	M	1 cada 800.0 m <sup>2</sup>	
	N	1 cada 450.0 m <sup>2</sup>	
	O	1 cada 200.0 m <sup>2</sup>	
	Estos sondeos se distribuirán uniformemente en la superficie del terreno y al menos el 70% dentro de la superficie a ocupar por el edificio.		
Campaña de categoría II	La cantidad de puntos a reconocer mínima (n) será de 2, los cuales se dispondrán dentro de la superficie a ocupar por el edificio.		
Campaña de categoría IV	Se deberá realizar una exploración por apoyo de la estructura o uno cada 6.0 m en el caso de muros de carga. Este número podrá reducirse durante la realización de la campaña cuando entre puntos contiguos se observa cierta homogeneidad o pueda establecerse correlación entre los tipos y propiedades de los terrenos reconocidos.		

FUENTE: Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG). (1975). Ministerio de la Vivienda, España.

**TABLA No. 4.20** Clasificación de las estructuras, según modulación media entre apoyos y número de plantas.

TIPO DE ESTRUCTURA	MODULACIÓN MEDIA ENTRE APOYOS	NÚMERO DE PLANTAS INCLUIDOS SÓTANOS		
		<3	3 - 10	>10
Porticadas de acero	<7	M	N	O
Porticadas de concreto	≥7	N	O	O
Prefabricada colgada	<7	M	O	O
Otras estructuras	≥7	N	O	O
Cuando el edificio a cimentar conste de varias partes separadas por juntas estructurales, se considera cada zona como un edificio independiente.				

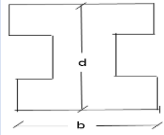
FUENTE: Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG). (1975). Ministerio de la Vivienda, España.



La tabla No.4.21 define las profundidades a explorar según el tipo de categoría de campaña I, II, III y IV.

**TABLA No. 4.21** Profundidades a explorar según la categoría de campaña.

TIPOS DE CAMPAÑA	ESPECIFICACIÓN DE PROFUNDIDAD														
Campaña de categoría I	<p>Se determina con <math>p = f + z</math>  Dónde:  f: Profundidad en metros del plano de apoyo de la cimentación prevista, conocido en nuestro medio como profundidad de desplante (<math>D_i</math>).  z: Igual a <math>1.5B</math>, siendo B el ancho en metros de la zapata mayor de la cimentación prevista.</p>														
Campaña de categoría II	<p>Se determina con <math>p = f + z</math>  Dónde:  f: Cota en metros, medida desde la superficie del terreno hasta el nivel más bajo del edificio a cimentar, conocido en nuestro medio como profundidad de desplante (<math>D_i</math>).  z: Profundidad en metros, determinada en el siguiente cuadro en función del tipo de edificación y de <math>q_o</math>, siendo <math>q_o</math> la relación entre la suma en toneladas, del peso propio de las cargas permanentes y sobrecargas del edificio a cimentar y el área en <math>m^2</math> a ocupar por este.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tipo de edificio*</th> <th><math>q_o</math> (T/m<sup>2</sup>)</th> <th>z (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>M</td> <td><math>\leq 10.0</math></td> <td><math>b^{**}</math></td> </tr> <tr> <td>N</td> <td><math>&gt; 10.0</math></td> <td>b</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">O</td> <td><math>\leq 10.0</math></td> <td>b</td> </tr> <tr> <td><math>&gt; 10.0</math></td> <td><math>1.5b</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>**Siendo b la dimensión menor en planta del edificio en metros.</p> <p>En el caso de ser conocida la existencia de un estrato rocoso o un estrato resistente y que normalmente se utiliza como plano de apoyo de cimentación en la zona, se tomara para p la profundidad de dicho estrato.</p>	Tipo de edificio*	$q_o$ (T/m <sup>2</sup> )	z (m)	M	$\leq 10.0$	$b^{**}$	N	$> 10.0$	b	O	$\leq 10.0$	b	$> 10.0$	$1.5b$
Tipo de edificio*	$q_o$ (T/m <sup>2</sup> )	z (m)													
M	$\leq 10.0$	$b^{**}$													
N	$> 10.0$	b													
O	$\leq 10.0$	b													
	$> 10.0$	$1.5b$													
Campaña de categoría VI	<p>Se determina con <math>p = f + z</math>  Dónde:  f: Cota en metros medida desde la superficie del terreno hasta el nivel más bajo del edificio a cimentar, conocido en nuestro medio como profundidad de desplante (<math>D_i</math>).  z: Igual a <math>\frac{q_o \cdot b}{10}</math> en metros.</p> <p>Siendo:  <math>q_o</math>: Relación entre la suma en toneladas, del peso propio de las cargas permanentes y sobrecargas del edificio a cimentar y el área en <math>m^2</math> a ocupar por este.  b: Dimensión menor en planta del edificio en metros. Esta se determina con el cociente del área en <math>m^2</math> de la</p>														

TIPOS DE CAMPAÑA	ESPECIFICACIÓN DE PROFUNDIDAD
	<p>superficie de terreno a ocupar por el edificio y la mayor distancia “d” en metros entre los puntos medios de los perímetros cerrados opuestos. (Ver figura 4.9)</p> <p><b>Figura No. 4.9</b> Dimensión menor en planta de un área de edificio.</p>  <p>FUENTE: Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG,), Ministerio de la Vivienda, España,</p>

FUENTE: Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG). (1975). Ministerio de la Vivienda, España.

- **Norma colombiana (1998)**

Para establecer el número y profundidad de sondeos, la normativa colombiana define una categorización de las edificaciones (normal, intermedia, alta y especial), para edificios según el área de lote implicado y la altura de edificación, además realiza una clasificación con base a la variabilidad del suelo, como se muestra en las tablas Nos. 4.22 y 4.23 respectivamente, ambos criterios se utilizan para definir el grado de complejidad de la obra (I, II, III y IV), como se puede observar en la tabla No.4.24.

**TABLA No. 4.22** Categoría de la edificación

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN	EDIFICIOS	
	Lote m <sup>2</sup>	No. Pisos
Normal	100.0 a 250.0	<4
Intermedia	250.0 a 1000.0	4-7
Alta	1000.0 a 1500.0	8-14
Especial	>1500.0	>15

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

**TABLA No. 4.23** Clasificación en base a la Variabilidad del Suelo

<b>VARIABILIDAD DEL SUELO.</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Baja</b>	Subsuelos donde no existen variaciones importantes entre el lugar programado para una perforación. Originados en formaciones geológicas simples, presentan materiales de espesores y características mecánicas aproximadamente homogéneas, cubren grandes áreas con materiales uniformes tales como depósitos lacustres, llanuras aluviales, terrazas de ríos en sus cursos medio-bajo, depósitos de inundación, suelos residuales en zonas de pendiente baja y uniforme, y en general suelos con pendientes transversales de hasta 10.0%.
<b>Media</b>	Situación intermedia entre variabilidad alta y baja, como terrazas y llanuras aluviales en curso medio, desembocaduras de ríos y quebradas, suelos residuales relativamente complejos, suelos con pendientes transversales desde 10.0% - 50.0%, en general, los depósitos no contemplados en las anteriores.
<b>Alta</b>	Subsuelos donde existen variaciones importantes entre una perforación y otra. Están originadas en formaciones geológicas complejas, con alternancia de capas de materiales con orígenes y espesores diferentes, como depósitos de ladera, flujo de lodos y escombros, depósitos aluviales intercalados. Se incluyen la variabilidad los terrenos sometidos a alteraciones por deslizamientos, movimientos de tierra, voladeros, depósitos de escombros, minas y canteras y suelos con pendientes superiores a 50.0%.

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

**TABLA No. 4.24** Grado de complejidad de la obra

<b>CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN</b>	<b>VARIABILIDAD DEL SUELO</b>		
	Baja	Media	Alta
Normal	I	I	II
Intermedia	II	II	III
Alta	III	III	III
Especial	III	IV	IV

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

Una vez definido el grado de complejidad de la obra con base a los requisitos mencionados (categoría de edificación y variabilidad del suelo) es posible establecer el número mínimo de sondeo y sus profundidades como se muestra en la tabla No.4.25.

**TABLA No. 4.25** Número mínimo de perforaciones y profundidad a mínima a explorar.

COMPLEJIDAD	NÚMERO MÍNIMO DE SONDEOS Y PROFUNDIDAD	
	Número mínimo de sondeos	Profundidad (m)
I	3	15.0
II	4	20.0
III	5	25.0
IV	6	30.0

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H- Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo)

- **Norma técnica de Costa Rica (2001)**

Esta normativa plantea que, para definir el número de perforaciones, profundidad y espaciamiento, se debe establecer la magnitud de la obra (baja, media, alta y especial), así como también de la complejidad geotécnica, la cual es establecida por el criterio del geotecnista.

#### Magnitud de la obra

En la tabla No. 4.26 se define la magnitud de la obra con base a las características propias del proyecto.

**TABLA No. 4.26** Requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio

<b>MAGNITUD DE LA OBRA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Baja	Construcciones menores de tres niveles. Incluye residencias, bodegas, canales, urbanizaciones, áreas industriales.
Media	Edificaciones de cuatro a diez niveles o cargas menores de trescientas toneladas por apoyo.
Alta	Edificaciones mayores de diez niveles o cargas mayores de trescientas toneladas por apoyo.
Especial	Construcciones que, por su magnitud, complejidad estructural o de excavación, o condiciones especiales de proceso constructivo, requieren de estudios preliminares, casos especiales de fundación como losas, pilotes, cajones de cimentación, etc.

FUENTE: Código de cimentación de Costa Rica. (2001). Asociación Costarricense de Geotecnia. Costa Rica.

### Complejidad geotécnica

Esta normativa establece que la clasificación de la complejidad geotécnica se deja a criterio del ingeniero geotecnista que esté a cargo del estudio correspondiente.

La tabla No. 4.27 muestra los requerimientos mínimos que se deben cumplir en un estudio de suelo.

**TABLA No. 4.27** Requerimientos mínimos que se deben cumplir en el estudio

<b>MAGNITUD DE LA OBRA</b> \ <b>COMPLEJIDAD GEOTÉCNICA</b>	<b>BAJA</b>	<b>MEDIA</b>	<b>ALTA</b>
<b>BAJA</b>	N mín.: 2 E Max.: 60.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +2.0 m	N mín.: 3 E máx.: 40.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +3.0 m	N mín.: 4 E máx.: 30.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +4.0 m
<b>MEDIA</b>	N mín.: 2 E máx.: 50.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +3.0 m	N mín.: 3 E máx.: 35.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +3.0 m	N mín.: 4 E máx.: 25.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +4.0 m
<b>ALTA</b>	N mín.: 2 E máx.: 40.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +4.0 m	N mín.: 3 E máx.: 30.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +3.0 m	N mín.: 4 E máx.: 20.0 m Pmin: D <sub>r</sub> +5.0 m
<b>ESPECIAL</b>	La campaña de exploración de campo depende del proyecto y será definida por el ingeniero geotécnico.		

FUENTE: Código de cimentación de Costa Rica. (2001). Asociación Costarricense de Geotecnia. Costa Rica.  
Dónde:

N mín.: Número mínimo de perforaciones o puntos de exploración.

E Máx.: Espaciamiento máximo entre puntos de sondeo o de exploración.

Pmin: Profundidad mínima de los sondeos, en m.

D<sub>r</sub>: Profundidad de desplante estimada para las cimentaciones, en metros.

De las normativas internacionales descritas anteriormente, se definieron algunas recomendaciones generales a tomar en cuenta en la etapa de planificación para edificaciones, las cuales se detallan a continuación:

- Al menos el 50% de los sondeos deben quedar ubicados dentro de la proyección sobre el terreno de las construcciones.
- Se considera como número mínimo de perforaciones tres sondeos.
- El número de sondeos finalmente ejecutados para cada proyecto, deberá cubrir completamente el área que ocuparán las construcciones contempladas, sin embargo, cuando se tenga presencia de taludes,

deberán ser considerados para la evaluación del comportamiento geotécnico de la estructura.

- En los casos que se tengan rellenos sobre el nivel actual del terreno natural en zonas bajas, donde se esperan encontrar en el subsuelo depósitos de suelos blandos, se deberá realizar sondeos más profundos.

A partir de lo planteado, se realizó un resumen de los requerimientos mínimos que establecen las normativas técnicas internacionales, como se presenta en la tabla No.4.28. El número, profundidad y espaciamiento de sondeos, se clasifican según los rangos de niveles que adopta cada normativa; sin embargo, en la presente investigación se utilizará la clasificación HAZUS.

Para los requerimientos mínimos de número de sondeos y profundidad, se puede observar que la norma colombiana presenta los valores más conservadores para ambos criterios, cabe destacar que la normativa de Costa Rica es la única que presenta requerimientos para definir el espaciamiento entre sondeos.

**TABLA No. 4.28** Resumen de requerimientos mínimos para número, espaciamiento y profundidad de sondeos para edificaciones de normativas internacionales.

NORMA	NIVELES	No. MÍNIMO DE SONDEOS	PROFUNDIDAD MÍNIMA (m)	ESPACIAMIENTO (m)
Ecuatoriana	3	3	6.0	-
	4 - 10	4	15.0	-
	11 - 20	4	25.0	-
	>20	5	30.0	-
Colombiana	4 - 7	4	20.0	-
	8 - 14	5	25.0	-
	>15	6	30.0	-
Costarricense	4 - 10	3	$D_f+3.0$	35.0
	>10	3	$D_f+3.0$	30.0

FUENTE: De los autores.

#### 4.2.3 ENTREVISTAS A ESPECIALISTAS EN EL ÁREA DE GEOTECNIA.

Se realizaron visitas a empresas que se dedican a la elaboración de estudios de suelos, con el objetivo de conocer sus criterios geotécnicos con base a su experiencia laboral para edificaciones, en la tabla No. 4.29 se muestra un cuadro comparativo de los requerimientos mínimos que fueron planteados.

**TABLA No. 4.29** Cuadro comparativo de requerimientos mínimos para edificaciones.

EDIFICACIONES	
Especialista No. 1	Especialista No. 2
Cantidad mínima de sondeos:3 Profundidad mínima a explorar por debajo de la cimentación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para tres a cinco niveles se debe explorar (<math>D_f + 6.0</math> m)</li> <li>• Para seis a diez niveles de debe explorar mínimo (<math>D_f + (10.0 - 12.0</math> m)).</li> </ul> Espaciamiento: Para el espaciamiento se recomienda un radio de influencia mínimo de 6.0 m y máximo 20.0 m.	Cantidad mínima de sondeos: 2 Profundidad mínima a explorar por debajo de la cimentación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para tres niveles se debe explorar (<math>D_f + 8.0</math> m)</li> <li>• Para cuatro niveles se debe explorar (<math>D_f + (10.0 - 12.0</math> m))</li> <li>• Para cinco niveles se debe explorar (<math>D_f + 15.0</math> m)</li> <li>• Para seis a siete niveles es necesario rotativas hasta 20.0 m.</li> <li>• Para siete a diez niveles es necesario estudios geofísicos más especializados.</li> <li>• Para el espaciamiento se recomienda un radio de influencia mínimo que varía entre 15.0 - 20.0 m dependiendo del área del terreno o proyecto.</li> </ul>
Ubicación: Construcciones de gran altura, que haya mayor interacción entre estructurista y geotecnista, ya que se busca los sondeos que le sean útiles al estructurista.	



<p>En el caso que existan taludes cerca de las edificaciones, se tomara en cuenta los siguientes criterios para definir la exploración:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Altura del talud</li> <li>• Pendiente</li> <li>• Si tiene cargas</li> <li>• Distancia entre edificación y talud</li> </ul> <p>Para garantizar profundidad del estrato resistente se debe explorar como mínimo 2.0 m.</p> <p>En el caso que se encuentre roca o lecho rocoso de debe de explorar como mínimo 3.0 m para garantizar la calidad de este.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia máxima entre sondeo de 30.0 m.</li> </ul> <p>Ubicación: En el caso que existan taludes cerca de las edificaciones, se recomiendan los siguientes criterios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se colocan sondeos en la corona y al pie de talud, lo ideal es realizar un sondeo intermedio para ver la distribución de estratos en medio del talud, sin embargo, existen limitaciones físicas (montaje de equipo).</li> <li>• El espaciamiento de los sondeos es de 15.0 a 20.0 m linealmente a lo largo del talud.</li> <li>• Se recomienda perforar toda la altura del talud con equipo rotativo, sin embargo, esto requiere mayor costo económico.</li> <li>• Para verificar la continuidad del estrato resistente de 3 a 5 niveles son 5.0 m de exploración.</li> <li>• Para edificaciones de 6 a 10 niveles se debe realizar un análisis del bulbo de presiones hasta donde se obtenga 0.5 kg/cm<sup>2</sup> de transferencia de carga.</li> </ul>
--	---

FUENTE: De los autores

De lo que se recopiló anteriormente se puede dejar entre ver que debido a la alta inversión que requiere este tipo de edificaciones, se exige que se realice un estudio geotécnico más detallado o especializado, para garantizar la seguridad de este; el tipo de exploraciones deben incluir, SPT, utilizar sondeos de tipo rotativo y complementarlos con estudios geofísicos, tomando en consideración el criterio del geotecnista.

### **4.3 URBANIZACIONES**

Una urbanización es un conjunto de viviendas situadas generalmente en un antiguo medio rural junto a otras poblaciones, para urbanizar un terreno, éste se puede dividir en polígonos, manzanas, parcelas, etc. a fin de construir las viviendas o infraestructura necesaria.

Para urbanizaciones el factor crítico es determinar el espaciamiento y ubicación de sondeos debido a las extensiones del terreno, en el caso de la profundidad de exploración se estima un rango aproximando entre 4.0 - 6.0 m de perforación, considerando que generalmente son viviendas de uno y/o dos niveles, por lo que en la mayoría de los casos se utilizan cimentaciones superficiales (si el estrato resistente se encuentra superficial), donde es necesario conocer su nivel de desplante a cimentar y la capacidad de carga del estrato resistente.

#### **4.3.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS NECESARIOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA URBANIZACIONES, ESTABLECIDOS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS.**

Para desarrollar este apartado se presenta lo establecido por: Ortiz-Gesta-Mazo y la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993), que se describen a continuación:

✓ **Número y espaciamiento de sondeos**

**Teoría según Ortiz-Gesta-Mazo**

Como se planteó anteriormente, la mayor dificultad para definir los lineamientos mínimos para urbanizaciones, es establecer la cantidad y espaciamiento entre exploraciones debido a las extensiones de terreno.

Para la aplicación de esta teoría el autor primero realiza una clasificación en base a las características del terreno y variabilidad del suelo, con este parámetro y con el área que abarca el proyecto se puede determinar el número mínimo de sondeos. En las tablas No. 4.30 y 4.31 se muestra lo planteado.

**TABLA No. 4.30** Descripción del terreno según su complejidad

<b>COMPLEJIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
BAJA	Terrenos de topografía suave, muy homogéneos en planta dentro del área estudiada y de buena calidad como cimentación (terrenos aptos para cimentaciones superficiales)
MEDIA	Situación intermedia entre baja y alta.
ALTA	Terrenos de topografía movida y/o bastante heterogéneos en planta y con deficientes condiciones de cimentación (posible empleo de pilotajes)

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

**TABLA No. 4.31** Número mínimo de sondeos

<b>COMPLEJIDAD*</b>	<b>SUPERFICIE (Ha)</b>						
	<b>1.0</b>	<b>10.0</b>	<b>50.0</b>	<b>100.0</b>	<b>200.0</b>	<b>500.0</b>	<b>1000.0</b>
<b>BAJA</b>	3	6	8	9	10	11	12
<b>MEDIA</b>	5	10	14	15	16	18	20
<b>ALTA</b>	6	14	20	22	24	27	30

FUENTE: Ortiz-Gesta-Mazo. (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición.

\*Se entiende tanto la complejidad geotécnica prevista como la topográfica y morfológica.

Si en el área estudiada existen zonas de diferente complejidad las condiciones de la tabla No. 4.30 se aplicarán por separado a cada una de ellas.

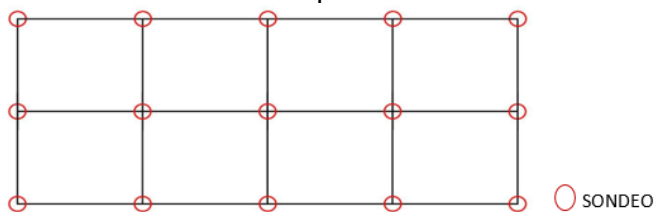
**“Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993)**

Ubicación de sondeos:

Uno de los criterios comúnmente utilizados en el país es el de la cuadrícula. La topografía del lugar es un factor determinante por lo cual se deben considerar dos casos (Calderón, et al, 1993):

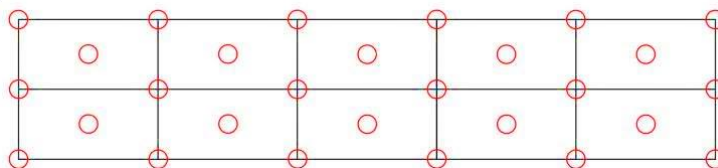
- Si el terreno es irregular, muy irregular o de pendiente fuerte, las perforaciones tendrán una separación de 25.0 m a 30.0 m, como se muestra en la figura No.4.10.
- En terrenos pocos irregulares y planos, la separación entre sondeos es de 45.0 m a 60.0 m, con la salvedad que se realizara una perforación en medio de cada cuadrícula, como se muestra en la figura No.4.11.

**Figura No. 4.10.** Distribución de sondeos para urbanizaciones en terrenos irregulares.



FUENTE: Calderón et al, (1993). “Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil”, Universidad de El Salvador

**Figura No. 4.11.** Distribución de sondeos para urbanizaciones en terrenos planos.



FUENTE: Calderón et al, (1993). “Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil”, Universidad de El Salvador.

✓ **Profundidad de sondeos**

Se recomienda profundidades de sondeos de 4.0 m a 6.0 m, medidas desde el nivel de fundación. (Calderón, et al, 1993)

A continuación, se presenta una tabla resumen No. 4.32, en la que se plasman los requerimientos mínimos establecidos por la teoría de Ortiz-Gesta-Mazo y la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993).

**TABLA No.4. 32** Resumen de requerimientos mínimos para urbanizaciones. **ORTIZ-GESTA-MAZO (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, CUARTA EDICIÓN.**

ÁREA DE URBANIZACIÓN	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Baja (1.0 ha)	3	No define	No define
Baja (1 00.0ha)	9		
Baja (1 000.0ha)	12		
Media (1.0 ha)	5		
Media (1 00.0ha)	15		
Media (1 000.0ha)	20		
Alta (1.0 ha)	6		
Alta (100.0 ha)	22		
Alta (1 000.0 ha)	30		
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
TOPOGRAFÍA	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m) MÉTODO DE LA CUADRICULA	PROFUNDIDAD (m)
Quebrada	No define	25.0 - 30.0	4.0 m a 6.0 m, medidas desde el nivel de desplante.
Uniforme		45.0 - 60.0 con la salvedad que se realizara una perforación en medio de cada cuadrícula.	

FUENTE: De los autores.

#### 4.3.2 LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS INTERNACIONALES

Se presentan las normativas chilena y colombiana las cuales describen los lineamientos mínimos para el número y profundidad de sondeos en urbanizaciones, sin embargo, estas normativas no establecen lineamientos para definir el espaciamiento entre los sondeos.

- **Norma técnica chilena (2014)**

Según esta normativa se determina el número de sondeos a utilizar según el área a cubrir y la profundidad aproximada de exploración, en esta se presentan dos casos uno para profundidades menores o iguales a 4.0 m y el otro para profundidades que oscila entre 4.0 m y 8.0 m

Cantidad mínima de puntos de exploración:

Según lo detallado en el apartado anterior, se muestra en las tablas Nos.4.33 y 4.34 la cantidad de sondeos a realizar según esta normativa.

**TABLA No. 4.33.** Número mínimo de puntos de exploración para profundidades hasta 4.0 m.

<b>SUPERFICIE A EXPLORAR (m<sup>2</sup>).</b>	<b>CANTIDAD DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN</b>
Hasta 500.0	2
De 501.0 a 1000.0	3
De 1001.0 a 2000.0	4
De 2001.0 a 5000.0	5
De 5001.0 a 10 000.0	6
De 10 001.0 a 20 000.0	8
De 20 001.0 a 30 000.0	10
Más de 30 000.0	Según lo indicado por el profesional competente, con un mínimo de 12.

FUENTE: Instituto Nacional de Normalización (2014). Norma Chilena Geotecnia- Estudio de la Mecánica de Suelos. NCh1508.

**TABLA No. 4.34.** Número mínimo de puntos de exploración para profundidades sobre 4.0 m y hasta 8.0 m.

SUPERFICIE A EXPLORAR (m <sup>2</sup> ).	CANTIDAD DE PUNTOS DE EXPLORACIÓN
Hasta 1000.0	2
De 1001.0 a 4000.0	3
De 4000.0 a 10 000.0	4
Más de 10 000.0	Según lo indicado por el personal competente, con un mínimo de 5.

FUENTE: Instituto Nacional de Normalización (2014). Norma Chilena Geotecnia- Estudio de la Mecánica de Suelos. NCh1508.

El número de sondeos debe ser conforme a lo indicado en las tablas anteriores, además se debe tomar en cuenta lo que se establece en la cláusula A.1 de dicha normativa, la cual se describe a continuación:

**Clausula A.1.** : Profundidad mínima a alcanzar en cada punto de exploración para cargas estáticas

#### **Fundaciones superficiales**

Se determina de la manera siguiente:

$$Z_p \geq D_f + z$$

Dónde:

$D_f$  = distancia vertical desde la superficie del terreno hasta el nivel de fundación, conocido también como nivel de desplante.

$z = 1.5B$ ; siendo B el lado menor de la fundación prevista de mayor área.

$Z_p$  = Profundidad a explorar.

- El valor de z se puede incrementar en función de la calidad del suelo, de la geología, los antecedentes sísmicos de la zona y la importancia de la estructura.

- Para el caso de losas de fundación, la profundidad  $z$  queda condicionada a un mínimo de  $B$ , salvo que se justifique una profundidad menor.
- En ningún caso  $Z_p$  puede ser menor que 2.5 m, excepto si se encuentra el basamento rocoso antes de alcanzar la profundidad  $Z_p$ .
- La profundidad de exploración  $Z_p$  se puede acortar si se encuentra roca antes de alcanzar dicha profundidad. En cuyo caso se debe llevar a cabo una verificación para descartar que no corresponda a una roca aislada o a un estrato cementado de poco espesor.
- En caso que la fundación se apoye directamente en roca, ésta se debe investigar para determinar sus propiedades geomecánicas.

Si al aplicar la **cláusula A.1** algunas estructuras del proyecto o todo el proyecto requieren exploraciones de más de 8.0 m de profundidad, la cantidad de sondeos de esa zona se debe determinar por el profesional competente, sin embargo, las otras estructuras del proyecto cimentadas a menor profundidad deben contar con la cantidad de sondeos indicadas en las tablas Nos. 4.33 y 4.34.

- **Norma colombiana (1998)**

Esta normativa categoriza las edificaciones por área de lote o por número de unidades y junto con la variabilidad del terreno definida como baja, media y alta, se determina el grado de complejidad de la obra, para luego determinar el número y profundidad de las perforaciones.



La tabla No. 4.35 muestra la categoría de la edificación según el área de proyecto o número de unidades, clasificándolas como normal, intermedia, alta y especial. En la tabla No.4.36 se clasifica la variabilidad del suelo según las condiciones geológicas que estén presente.

**TABLA No. 4.35.** Categoría de edificación según área de proyecto y número de unidades.

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN	CASAS	
	Lote Proyecto m <sup>2</sup>	No. de Unidades
Normal	<1000.0	0 - 10
Intermedia	1000.0 - 1500.0	10 - 100
Alta	5000.0 - 10000.0	100 - 500
Especial	>10000.0	>500

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo).

**TABLA No. 4.36.** Clasificación de la Variabilidad del Suelo según condiciones geológicas.

VARIABILIDAD	DESCRIPCIÓN
<b>Baja</b>	Subsuelos donde no existen variaciones importantes entre el lugar programado para una perforación. Originados en formaciones geológicas simples, presentan materiales de espesores y características mecánicas aproximadamente homogéneas, cubren grandes áreas con materiales uniformes tales como depósitos lacustres, llanuras aluviales, terrazas de ríos en sus cursos medio-bajo, depósitos de inundación, suelos residuales en zonas de pendiente baja y uniforme, y en general suelos con pendientes transversales de hasta 10.0%.
<b>Media</b>	Situación intermedia entre variabilidad alta y baja, como terrazas y llanuras aluviales en curso medio, desembocaduras de ríos y quebradas, suelos residuales relativamente complejos, suelos con pendientes transversales desde 10.0%-50.0%, en general, los depósitos no contemplados en las anteriores.
<b>Alta</b>	Subsuelos donde existen variaciones importantes entre una perforación y otra. Están originadas en formaciones geológicas complejas, con alternancia de capas de materiales con orígenes y espesores diferentes, como depósitos de ladera, flujo de lodos y escombros, depósitos aluviales intercalados. Se incluyen la variabilidad los terrenos sometidos a alteraciones por deslizamientos, movimientos de tierra, voladeros, depósitos de escombros, minas y canteras y suelos con pendientes superiores a 50.0%.

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo).

Luego de definir la categoría de la edificación y variabilidad del suelo, es posible establecer el grado de la complejidad de la obra según lo que establece la tabla No.4.37, posteriormente se determina el número mínimo y profundidad de las perforaciones, de acuerdo a la tabla No. 4.38

**TABLA No. 4.37.** Grado de complejidad de la obra

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN	VARIABILIDAD DEL SUELO		
	Baja	Media	Alta
Normal	I	I	II
Intermedia	II	II	III
Alta	III	III	III
Especial	III	IV	IV

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998). H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo).

**TABLA No. 4.38.** Número mínimo de perforaciones y profundidad

COMPLEJIDAD DE OBRA	NÚMERO MÍNIMO DE SONDEOS Y PROFUNDIDAD DE LOS MISMOS	
	Construcción de casas	Profundidad (m)
I	3	6.0
II	4	8.0
III	5	10.0
IV	6	15.0

FUENTE: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR. (1998).H-Estudios Geotécnicos (H.3 Investigación del Subsuelo).

Luego de la revisión de las normativas planteadas anteriormente, se realizó un resumen de los requerimientos mínimos con el objetivo de comparar los lineamientos adoptados por cada normativa, los cuales se detallan en la tabla No. 4.39.

**TABLA No. 4.39.** Resumen de requerimientos mínimos para urbanizaciones.

<b>INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2014). NORMA CHILENA GEOTECNIA-ESTUDIO DE LA MECÁNICA DE SUELOS. NCH1508.</b>			
RANGOS DE AREAS (m <sup>2</sup> )	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Hasta 500.0	2	No define	4.0
De 1001.0 a 2 000.0	4		
De 5001.0 a 10 000.0	6		
De 20 001.0 a 30 000.0	10		
Más de 30 000.0	Según lo indicado por el profesional competente, con un mínimo de 12.		
Hasta 1000.0	2	No define	Mayores de 4.0 a 8.0
De 1001.0 a 4000.0	3		
De 4000.0 a 10 000.0	4		
Más de 10 000.0	Según lo indicado por el personal competente, con un mínimo de 5.		
<b>NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98 TITULO H-ESTUDIOS GEOTÉCNICOS (H.3 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO)</b>			
COMPLEJIDAD (AREA/# VIVIENDA+TERRENO)	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
I	3	No define	6.0
II	4		8.0
III	5		10.0
IV	6		15.0

FUENTE: De los autores.

#### 4.3.3 ENTREVISTAS A ESPECIALISTAS EN EL ÁREA DE GEOTECNIA.

Con el objetivo de conocer los criterios geotécnicos necesarios para definir los requerimientos mínimos, se realizaron entrevistas a ingenieros/as que se dedican a realizar estudios de suelos, donde se obtuvo con base a su experiencia ciertos lineamientos para establecer el número, espaciamiento y profundidad de sondeos para urbanizaciones. En la tabla No 4.40, se presenta

un resumen de los diferentes criterios planteados por especialistas del área, relacionados con los requerimientos mínimos que se quiere determinar.

**TABLA No. 4.40.** Cuadro comparativo de requerimientos mínimos para urbanizaciones.

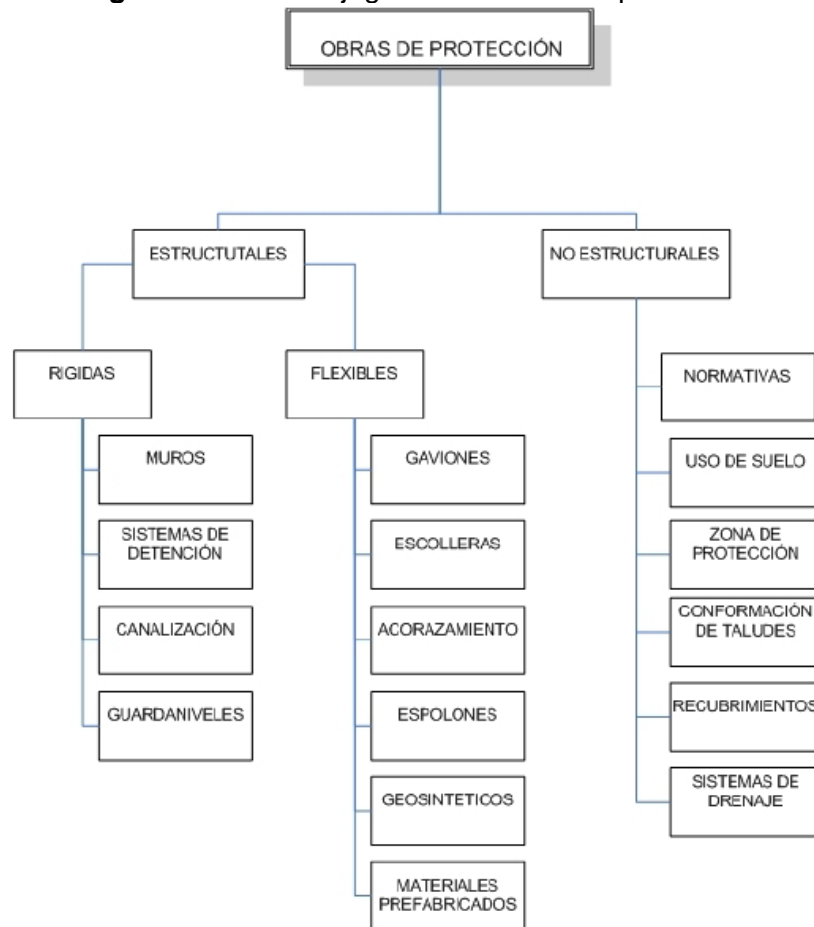
URBANIZACIONES	
Especialista No. 1	Especialista No. 2
<p>Número de sondeos: Cuando se conoce la distribución de la urbanización se recomienda realizar un sondeo cada cuatro casas.</p> <p>Sin la distribución de las viviendas en la urbanización, no se recomienda definir la ubicación de sondeos</p> <p>Profundidad: Las urbanizaciones en nuestro país, generalmente son viviendas de uno y/o dos niveles, en el que la mayoría de los casos se utilizan cimentaciones superficiales (si el estrato resistente se encuentra superficial), donde la profundidad mínima recomendada a explorar es de 6.0 m.</p>	<p>Número de sondeos: Se recomienda realizar de tres a cinco perforaciones por cada manzana, cuando el cliente no ha realizado una distribución de los lotes.</p> <p>Cuando se tengan planos con distribuciones de los lotes, se realiza una distribución de sondeos por cada 4 líneas de casas.</p> <p>Profundidad: Generalmente las urbanizaciones son viviendas de dos niveles, donde la profundidad a explorar se recomienda de 6.0 m, en el caso que el estrato resistente sea superficial.</p> <p>Cuando la topografía del terreno es irregular y se requieren trabajos de terracería, lo ideal es realizar dos estudios de suelos; el primero es una exploración preliminar con poca densidad de sondeos para conocer las condiciones generales del subsuelo, luego de los trabajos de terracería se realiza el segundo estudio de suelo que corresponde a la exploración definitiva, donde se definirá la profundidad a cimentar.</p>

FUENTE: De los autores

#### **4.4 OBRAS DE PROTECCIÓN**

Las obras de protección son todas aquellas construcciones que sirven para satisfacer las necesidades de seguridad de la población ante la interacción del desarrollo urbano y el entorno natural. Existen diferentes obras de protección que de manera general se pueden clasificar en estructurales y no estructurales, las estructurales son todas aquellas soluciones constructivas que son diseñadas para resistir cargas de acuerdo a una determinada sollicitación y las no estructurales son todas aquellas soluciones constructivas que no son diseñadas para resistir cargas, ambas pueden cumplir una función de protección contra la erosión e inundación. En la figura No.4.12 se presenta una clasificación de las diferentes obras de protección. (Molina, Pérez y Vásquez, 2009)

**Figura No. 4.12** Flujograma de obras de protección.



FUENTE: Molina, Pérez y Vásquez. (2009). "Caracterización geotécnica de las tefras tierra blanca joven: unidad "G" en la zona próximas y obras de protección".

Debido a la amplia gama en que se subdividen las obras de protección, esta investigación se limitará únicamente a estudiar las obras de protección tales como muros gavión y soil nailing, a continuación, se detalla cada una de ellas.

### **Estructuras flexibles (muros Gavión)**

Son estructuras que se deforman fácilmente por las presiones de la tierra sobre ellas o que se adaptan a los movimientos del suelo. Su efectividad depende de su peso y de la capacidad de soportar deformaciones importantes.

#### 4.4.1 GAVIONES

Muros gaviones son cajones de malla de alambre galvanizado que se rellenan de rocas. Algunas de las ventajas de la utilización de un muro gavión son las siguientes: simple de construir y mantener, utiliza los cantos y piedras disponibles en el sitio.

Permiten adaptarse a las deformaciones y a movimientos dentro de los límites aceptables, sin perder su estabilidad y eficiencia, así como también son elementos permeables, que no solo funcionan como muros de gravedad, sino que también como protección. (Molina, Pérez y Vásquez, 2009).

Para determinar las dimensiones de un muro de retención y su estabilidad se deben determinar las fuerzas que actúan sobre este, por lo que, se deben considerar las siguientes acciones:

- Empujes del suelo (relleno) del trasdós.
- El material en la base del muro.
- Presencia del nivel freático.
- Sobrecargas próximas.
- Presiones de compactación.
- Esfuerzos por cargas sísmicas.
- Efectos del proceso de compactación en los empujes del trasdós.

### **Requerimientos para cimentación de muro gavión**

Los gaviones debido a su flexibilidad es el único tipo de estructura que no requiere fundaciones profundas. Esta característica permite que la estructura se deforme mucho antes del colapso permitiendo la detección anticipada del problema y dando oportunidad de realizar intervenciones de recuperación. (Manual Técnico de Obras de Contención, Maccaferri).

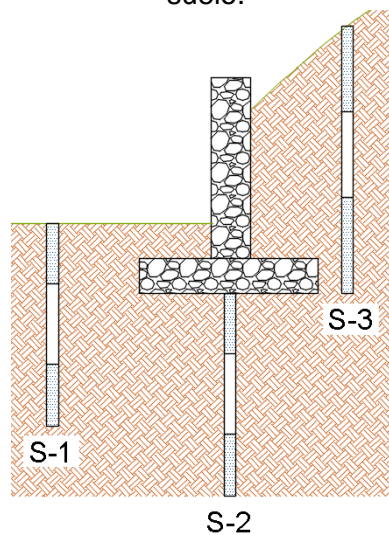
Con el objetivo de establecer los lineamientos mínimos para la superficie de cimentación de los muros gavión, este se evaluará como un muro de retención de tipo rígido, ya que ambos trabajan por su propio peso y se proyectan para retener una masa de suelo, por lo que en su diseño se debe conocer las condiciones propias del lugar (topografía, geología, etc.), las características geotécnicas de los materiales que generan empujes y del estrato sobre el cual se va a cimentar. Las principales características geotécnicas que deben evaluarse son: el peso unitario del material a contener, la cohesión y el ángulo de fricción interna. (Manual de diseño de estructuras flexibles de gaviones, 2013). Además, se debe considerar para su análisis las fuerzas externas actuantes como: el peso propio, intensidad de carga horizontal, empuje hidrostático, fuerzas sísmicas, sobrecargas actuantes y fuerzas de hinchamiento, en caso de que detrás del muro se encuentren arcillas expansivas.

Con base al planteamiento anterior se deben realizar exploraciones en la masa de suelo que soportará el muro, para obtener sus propiedades mecánicas y así determinar el empuje activo que esta generará, además se deberán realizar



perforaciones a lo largo de la base del muro para definir la profundidad de desplante en la que el suelo presente una capacidad de carga mayor al esfuerzo de contacto que este transmitirá, tal planteamiento se ilustra en la figura No.4.13

**Figura No. 4.13.** Perforaciones para determinar propiedades mecánicas del suelo.



FUENTE: De los autores

A continuación se presentan los requerimientos mínimos para muros tipo gavión, a partir de lo establecido por diferentes literaturas geotécnicas, entre ellas la Guía de cimentaciones en Obras de Carreteras. (2009), la Administración Federal de carreteras (FHWA), y la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993).

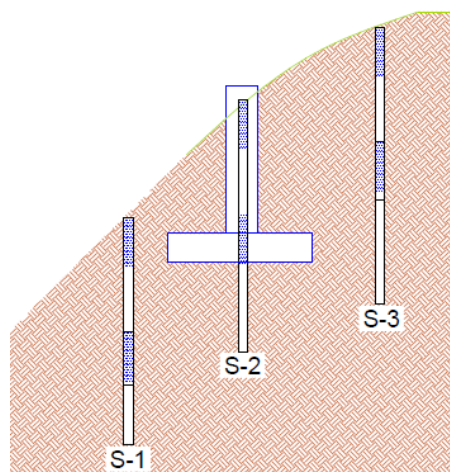
## REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA MUROS, ESTABLECIDOS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS.

### ✓ Número y espaciamiento entre sondeo:

La guía española de cimentaciones en Obras de Carreteras define la cantidad de sondeos a realizar según perfiles transversales al muro. En esos perfiles, se debe explorar el terreno por delante, debajo y detrás del muro para poder preparar las secciones de verificación adecuadamente.

Para esto, es conveniente investigar el perfil correspondiente a la mayor altura de muro y otros perfiles representativos. El número de perfiles a reconocer en detalle será, como mínimo, tres si el muro es de menos de 50.0 m de longitud y debe incrementarse en un perfil más por cada 20.0 m de longitud adicionales, se debe tomar en consideración la heterogeneidad del terreno y las dificultades previstas en la cimentación, ya que estas condiciones pueden intensificar estos reconocimientos mínimos, esto puede observarse en la figura No.4.14

**Figura No. 4.14** Número de perfiles a realizar según longitud del muro.



FUENTE: Guía de cimentaciones en Obras de Carreteras. (2009). Secretaria de Planificación E Infraestructura.

Para muros con una altura mayor de 10.0 m, la caracterización del cimiento debe realizarse con, al menos, tres puntos de reconocimiento por perfil.

Profundidad de los sondeos:

En cuanto a la profundidad de los sondeos, estos se deben explorar en el cimiento a una profundidad igual o superior a la altura del muro prevista, salvo que a menor profundidad se compruebe la existencia del estrato resistente.

**“Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993)**

Esta guía establece que se deben realizar por lo menos dos sondeos, sobre la línea de cimentación; y la separación entre ellos es de 15.0 m como promedio, dependiendo de la longitud del muro y de las condiciones topográficas y geológicas del terreno, quedando al criterio del ingeniero de campo, aumentar o disminuir esta separación.

#### **La Administración Federal de carreteras (FHWA)**

La Administración Federal de carreteras (FHWA), en su documento Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I, establece los siguientes requerimientos mínimos para muros:

- Los sondeos deben realizarse a intervalos mínimos de cada 30.0 m a lo largo de la cimentación de la estructura y a cada 45.0 m a lo largo de la parte posterior de la estructura de suelo reforzado.

- La profundidad de los sondeos depende de las características del subsuelo. Donde se haya detectado roca a poca profundidad los sondeos pueden tener una profundidad de 3.0 m y en todos los casos se recomienda determinar la profundidad a la cual se detecte suelo duro, espesores y características de los suelos sueltos o blandos. Es posible que sea necesaria una perforación más profunda para caracterizar mejor las laderas rocosas. La profundidad de las perforaciones deberá ser igual al doble de la altura de la pared o pendiente del muro. Si las condiciones del subsuelo dentro de esta profundidad se encuentran suelos débiles e inadecuados para las presiones anticipadas de la estructura, entonces las perforaciones deben extenderse hasta que se encuentren suelos razonablemente fuertes.
- En cada perforación deben tomarse muestras a cada 1.5 m y en los cambios en los estratos, para la identificación visual, clasificación y ensayos de laboratorio.

✓ **Profundidad de sondeos**

Con base a la teoría de transmisión de esfuerzos (bulbo de presiones) en condiciones normales de suelo se puede estimar la profundidad de sondeo como de 1.5 a 2.0 veces el ancho del cimiento del muro ( $P=1.5 \text{ a } 2.0 *B$ ), a partir del nivel de fundación.

Debido a que, en el predimensionamiento de los muros, se estima el ancho del cimiento como 0.665 veces la altura del muro ( $B = 0.665H$ ) al aplicar el factor de 1.5 a este ancho se tiene:  $P = 1.5 * 0.665H = 0.997 H = H$ ; por lo tanto, también se puede estimar una profundidad mínima de sondeos igual a la altura del muro, a partir del nivel de fundación. (Calderón, et al.1993)

### **LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS INTERNACIONALES**

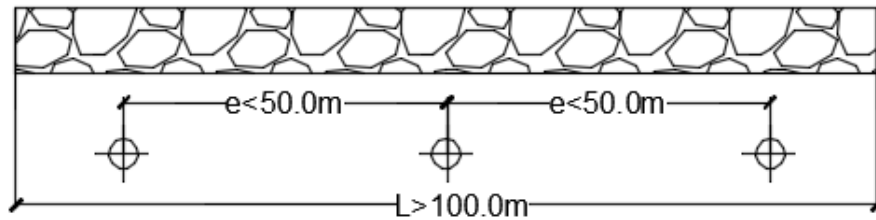
En el siguiente apartado se presenta “La Normativa Española de Seguridad Estructural Cimientos (SE-C, 2008)” que define los lineamientos mínimos de número y espaciamiento de sondeos para muros, con base a la altura y longitud de este.

- **Norma técnica española (2008)**

Número y espaciamiento entre sondeo

- El espaciamiento del sondeo depende de la longitud de la obra. Para obras de gran longitud, mayor que unos 100.0 m, se recomienda que los sondeos no resulten espaciados más de 50.0 m entre sí, como se observar en la figura No. 4.15.

**Figura No. 4.15** Espaciamiento de sondeo dependiendo de la longitud de la obra.

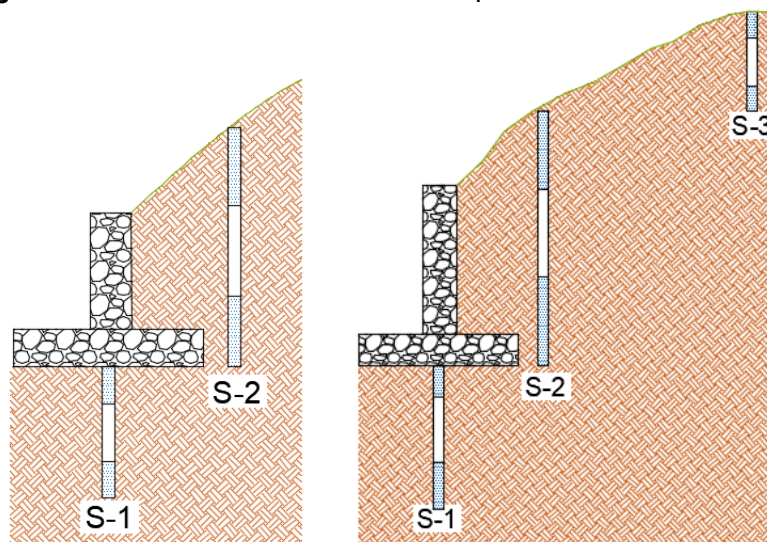


FUENTE: De los autores

L: Longitud total del muro.  
e: espaciamiento entre sondeos.

- Cuando los muros son de más de 5.0 m de altura se recomienda realizar al menos dos sondeos en cada perfil y se realizarán tres sondeos cuando la altura de este supere los 10.0 m, como se observa en la figura No. 4.16.

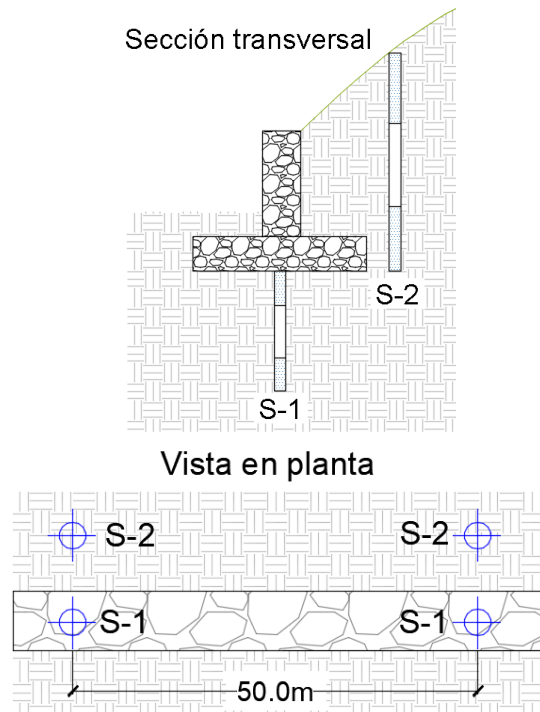
**Figura No. 4.16** Número de sondeo dependiendo de la altura de la obra.



FUENTE: De los autores

- El número de sondeos mínimo a realizar para muros es de dos a cada 50.0 m de longitud, tal como se muestra en la figura No.4.17

**Figura No. 4.17** Número de sondeos dependiendo de la longitud de la obra.



FUENTE: De los autores

- Esta norma no establece profundidad mínima a explorar.

Del planteamiento descrito anteriormente se presenta la tabla resumen No.4.41 que muestra la cantidad de perforaciones a realizar según la altura del muro.

**TABLA No.4.41.** Número de perforaciones según la altura del muro.

NÚMERO DE PERFILES TRANSVERSALES A LA OBRA		Nº DE PUNTOS POR PERFIL			ESQUEMA
<b>Muros</b>	1 perfil por cada 20.0 m o fracción de longitud total de muro	H < 5m	5m < H < 10m	H > 10m	
		1 Sondeo	2 Sondeos	3 Sondeos	

FUENTE: Seguridad Estructural Cimientos (SE-C). (2008). España

A continuación, se presenta en la tabla resumen No.4.42, un detalle de los lineamientos mínimos para muros anteriormente planteados, con el objetivo de realizar una comparación entre ellos, para posteriormente efectuar su respectivo análisis.

**TABLA No.4.42.** Resumen requerimientos mínimos para muros.**GUÍA ESPAÑOLA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERAS**

Longitud (L) / Altura (H) del muro	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD(m)
$L \leq 50.0 \text{ m} / H > 10.0 \text{ m}$	3 perfiles de 3 sondeos c/u	No define espaciamiento máximo, sin embargo, establece que se debe explorar adelante, por debajo y detrás del muro.	Explorar una profundidad igual o superior a la altura del muro, a menos que a menor profundidad se compruebe la existencia de roca sana.
$L \leq 50.0 \text{ m} / H \leq 10.0 \text{ m}$	3 perfiles de 2 sondeos c/u		
$L > 50.0 \text{ m} / H > 10.0 \text{ m}$	3 perfiles + 1 perfil/20.0 m de longitud adicionales de 3 sondeos c/u		
$L > 50.0 \text{ m} / H \leq 10.0 \text{ m}$	3 perfiles + 1 perfil/20.0 m de longitud adicionales de 2 sondeos c/u		



<b>ADMINISTRACIÓN FEDERAL DE CARRETERAS (FHWA)</b>			
	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
<b>A lo largo del alineamiento de la estructura</b>	No define	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizarse a intervalos mínimos de cada 30.0 m a lo largo de la cimentación</li> <li>• Cada 45.0 m a lo largo de la parte posterior de la estructura de suelo reforzado.</li> </ul>	La profundidad a explorar deberá ser igual al doble de la altura de la pared o pendiente del muro, sin embargo, si se detecta roca sana a poca profundidad los sondeos pueden tener una profundidad de 3.0 m
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
<b>Sobre la línea de cimentación</b>	2 sondeos	15.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.5 a 2.0 veces el ancho del cimiento del muro a partir del nivel de desplante.</li> <li>• Igual a la altura del muro, a partir del nivel de fundación.</li> </ul>
<b>NORMATIVA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL CIMIENTOS (SE-C, 2008)</b>			
<b>Longitud de la obra (L):</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
	1 perfil	Cada 20.0 m de la longitud total del muro.	No define
<b>L &gt; 100.0 m</b>	-	No mayor de 50.0 m entre sí.	
<b>Altura del muro (H):</b>			
<b>H &lt; 5.0 m</b>	1 sondeo / perfil		
<b>5.0 m &lt; H &lt; 10.0 m</b>	2 sondeos / perfil		
<b>H &gt; 10.0 m</b>	3 sondeos/ perfil		
<b>General</b>	2 sondeos	50.0	

FUENTE: De los autores.

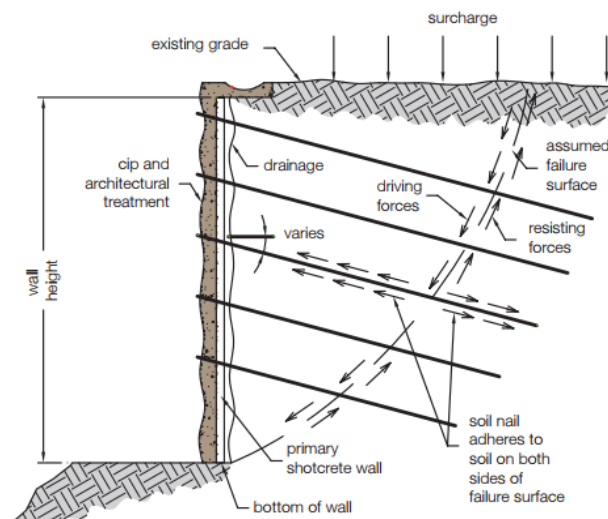
#### 4.4.2 SOIL NAILING

El método de Soil Nailing es una técnica moderna usada para el reforzamiento y mejoramiento de suelos in-situ para la estabilización de taludes o bien para la retención de excavaciones en proyectos de construcción, sin embargo; estos no pueden utilizarse en suelos con presencia del nivel freático, por problemas de adherencia del concreto proyectado, y no son rentables en terreno con suelos muy sueltos o blandos.

El concepto fundamental del Soil Nailing se basa en que el suelo es un material que no posee alta resistencia a la tensión, por lo que éste puede ser reforzado efectivamente por medio de la instalación de barras de acero con una mezcla de concreto llamadas “Nails” o “Clavos” espaciados de manera cercana y en donde el acero recibe la tarea de soportar los esfuerzos de tensión que se den en la masa de suelo reforzada. Estas barras, generalmente sub-horizontales, se colocan en agujeros previamente perforados y luego se coloca una mezcla de grout para rellenarlo y desarrollar una adherencia entre el suelo y el nail. Además, los nails se asocian comúnmente con inclusiones “pasivas”, en donde el término “pasivo” se refiere a que los nails no son preesforzados (como los anclajes activos de tierra) cuando éstos son instalados. Los nails son sometidos a fuerzas de tensión ocasionadas por las deformaciones laterales de la masa de suelo en respuesta a la disminución de la capacidad de soporte debido a las excavaciones que se den en ésta. Las inclusiones de los nails incrementan la resistencia a las fuerzas cortantes dentro de la masa de suelo y disminuyen los desplazamientos

durante y después de la construcción del Soil Nailing. La meta principal del método es formar una zona de suelo reforzada que actúe como una barrera que soporte el suelo detrás de ella, tal como se muestra en la figura No. 4.18 (Figuroa, Rodríguez y Zelada. 2011 "Análisis y Diseño de Estructuras de Retención de Aplicación Reciente en El Salvador").

**Figura No. 4.18** Zona de suelo reforzada por Soil Nailing.



FUENTE: DYWIDAG Soil Nails, Dallas, TX

Otra particularidad de este método es que su construcción se realiza de arriba hacia abajo, por lo tanto, el Soil Nailing no es aplicable para todos los tipos de suelos, ya que una condición que el suelo debe cumplir es la de poder permanecer estable un tiempo determinado mientras se realizan las excavaciones respectivas para la construcción del muro. (Figuroa, Rodríguez y Zelada. 2011. "Análisis y Diseño de Estructuras de Retención de Aplicación Reciente en El Salvador").

**Propiedades mínimas a determinar en la etapa exploratoria.**

Para la mayoría de los proyectos de muro soil nailing, se deben determinar cómo mínimo las siguientes propiedades del suelo a partir de la investigación de campo y pruebas de laboratorio:

- Clasificación del suelo (SUCS)
- Granulometría
- Contenido de humedad natural y Nivel de aguas subterránea
- Límites de Atterberg
- Contenido orgánico
- Parámetros de resistencia al corte de cada depósito principal de suelo

El desarrollo de la estratigrafía del sitio implica identificar el contacto entre el suelo, la roca erosionada y posiblemente el lecho rocoso. Las ubicaciones de estos contactos son importantes no solo para los análisis de estabilidad global, sino también para establecer si el soil nailing debe extenderse cerca o hacia los materiales más duros subyacentes. El diseñador también debe identificar la existencia de zonas húmedas y más suaves o agua en contacto con la roca.

Como se describió anteriormente, para la construcción de un muro soil nailing se debe de conocer las propiedades geotecnicas del suelo que conforma el talud y garantizar su estabilidad global por medio de un análisis de estabilidad de taludes, con el fin de que la longitud del anclaje del nail sobrepase la línea de

falla. En el siguiente apartado se describen los requerimientos mínimos para taludes, presentados por dos literaturas, la Federal Highway Administration, Geotechnical Engineering, Department of Transportation (2003), y la “Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993).

### **REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS DE SUELOS PARA TALUDES, ESTABLECIDAS POR DIFERENTES LITERATURAS GEOTÉCNICAS.**

#### ✓ **Número y espaciamiento entre sondeo:**

Según la Federal Highway Administration, la ubicación, cantidad y espaciamiento de las perforaciones están definidos, en gran medida por la disponibilidad de datos geotécnicos existentes, la variabilidad de las condiciones del subsuelo y otras limitaciones del proyecto, tal como se describe a continuación.

Espaciamiento:

La FHWD establece el espaciamiento de las perforaciones a lo largo de la línea central del muro, según la longitud de este, tal como se muestra en la tabla No.4.43.

**TABLA No. 4.43.** Espaciamiento de perforaciones a lo largo de la línea central del muro Soil Nailing

<b>LONGITUD DEL SOIL NAILING</b>	<b>ESPACIAMIENTO DE PERFORACIONES</b>
Mayor o igual a 30.0 m	30.0 m - 60.0 m a lo largo de la línea central del muro
Menores de 30.0 m	Una perforación a lo largo de la línea central del muro

FUENTE: Federal Highway Administration, Geotechnical Engineering. (2003). Department of Transportation.

Ubicación:

Para la ubicación de las perforaciones, es necesario realizar en frente y detrás de la pared del muro Nailing propuesto, tal como se describe en la tabla No. 4.44.

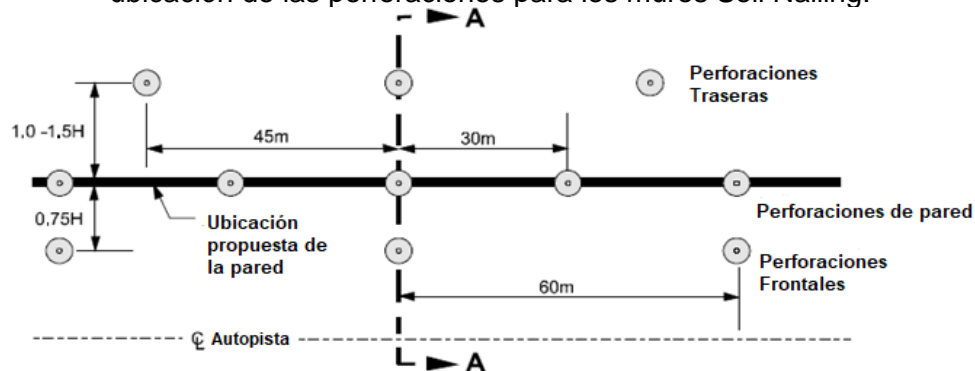
**TABLA No. 4.44.** Ubicación de perforaciones en un muro Nailing.

PERFORACIONES	
ENFRENTA DE LA PARED DEL MURO	DETRÁS DE LA PARED DEL MURO
<p>Las perforaciones enfrente de la pared deben ubicarse dentro de una distancia de hasta 0.75 veces la altura de la pared y debe estar espaciado hasta 60.0 m a lo largo de la línea central de la pared del muro. (Ver figura No.4.19)</p>	<p>Deberán estar ubicadas a una distancia de 1.0-1.5 veces la altura de la pared del muro y deberán ser espaciados hasta 45.0 m a lo largo de la línea central de la pared. (Ver figura No. 4.19) Si el suelo detrás de la pared propuesta es pendiente, la masa potencialmente deslizante detrás de la pared, será más grande que para un suelo horizontal. Por lo tanto, las perforaciones detrás del muro propuesto deben ubicarse más atrás del muro, hacia arriba aproximadamente de 1.5 a 2.0 veces la altura de la pared. (Ver figura No. 4.20)</p>

FUENTE: Federal Highway Administration, Geotechnical Engineering. (2003). Department of Transportation.

La figura No. 4.19 muestra lineamientos preliminares para la planificación del número, ubicación y espaciamiento de las perforaciones para los muros soil nailing.

**Figura No.4.19** Lineamientos preliminares para la planificación del número y la ubicación de las perforaciones para los muros Soil Nailing.

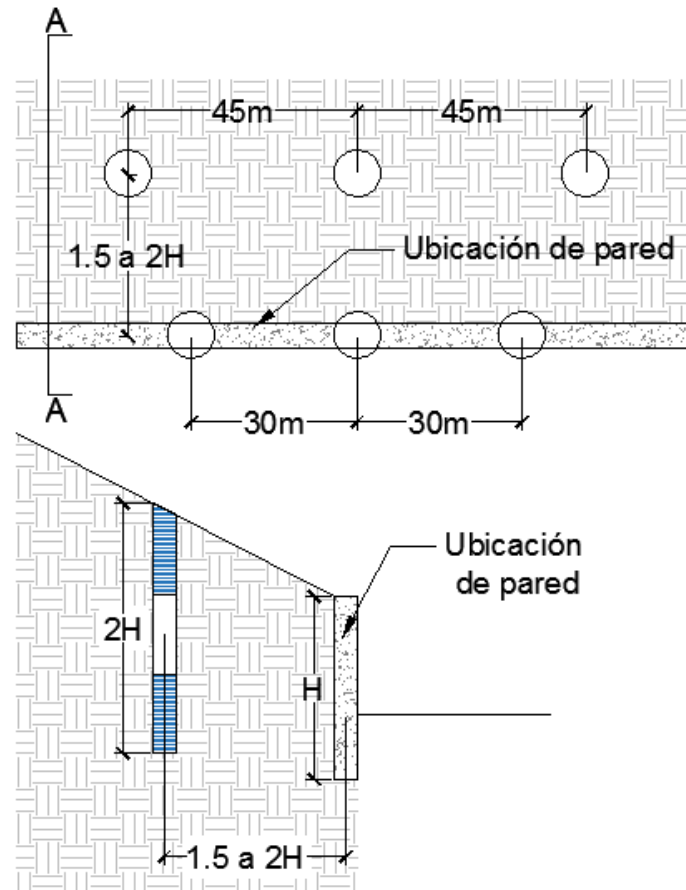


Nota: las distancias mostradas son las máximas recomendadas

PLANTA TIPICA

FUENTE: Federal Highway Administration. (2003). Geotechnical Engineering, Department of Transportation.

**Figura No.4.20** Ubicación de las perforaciones atrás del muro Soil Nailing.



**Sección A-A**

FUENTE: De los autores

**“Guía para pruebas de suelos que se realizan en campo y laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil” (Calderón, et al.1993)**

Espaciamiento:

Los sondeos serán a cada 15.0 m a 25.0 m, dependiendo de la longitud del talud y de la uniformidad del terreno; debiendo hacerse a lo largo de la corona, cuerpo y pie del talud.

Ubicación:

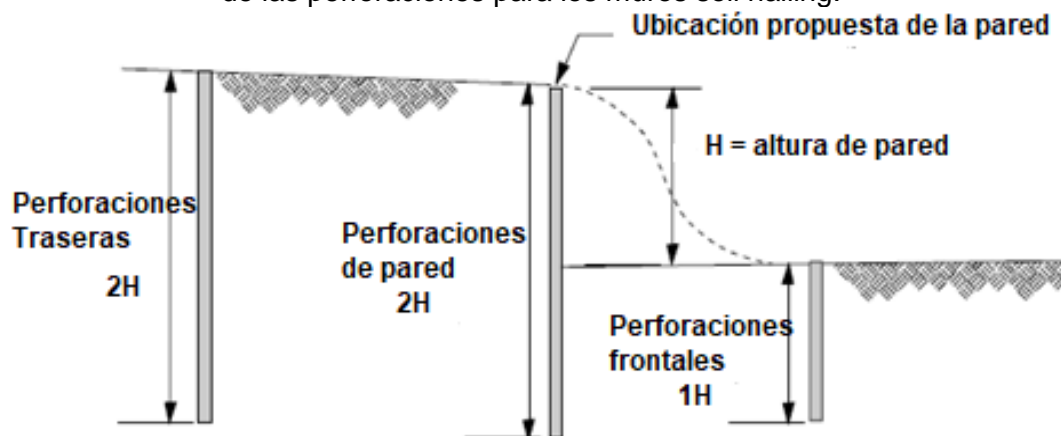
En todo caso, se prefiere que se practiquen sondeos por lo menos en la corona, cuerpo y el pie.

✓ **Profundidad de exploración**

La FHWA (2003) establece que, para la profundidad de las perforaciones, estas deben seleccionarse en función de los mecanismos de control relacionados con la estabilidad de la pared.

Las perforaciones deben profundizarse al menos la altura de pared completa del soil nailing por debajo del fondo de la excavación, tal como se muestra en la figura No.4.21.

**Figura No.4.21** Lineamientos preliminares para la planificación de la profundidad de las perforaciones para los muros soil nailing.



FUENTE: Federal Highway Administration, Geotechnical Engineering. (2003). Department of Transportation.

Las perforaciones deberían ser más profundas cuando los suelos son muy compresibles (suelos de grano fino; limo orgánico y turba), cuando se encuentran en el sitio detrás o debajo de la pared propuesta de soil nailing.



Las profundidades de perforación requeridas para los muros soil nailing pueden ser mayores si los suelos son sueltos, saturados y sin cohesión. Si se encuentra roca dentro de la profundidad seleccionada, se extraerá un núcleo de al menos 3.0 m de largo, el cual será dividido en dos especímenes de 1.5 m de largo para inspeccionar su naturaleza de la roca y sus discontinuidades.

### **LINEAMIENTOS DE NORMATIVAS Y CÓDIGOS INTERNACIONALES**

- **Código de Laderas Distrito Barranquilla, Colombia (2007)**

Para los análisis de estabilidad de taludes por lo menos el 50% de los sondeos deben alcanzar una profundidad de 1.25 veces la diferencia de altura entre el pie y la corona del talud analizado o penetrar por lo menos cuatro metros en material firme.

- **Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (2015).  
Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos**

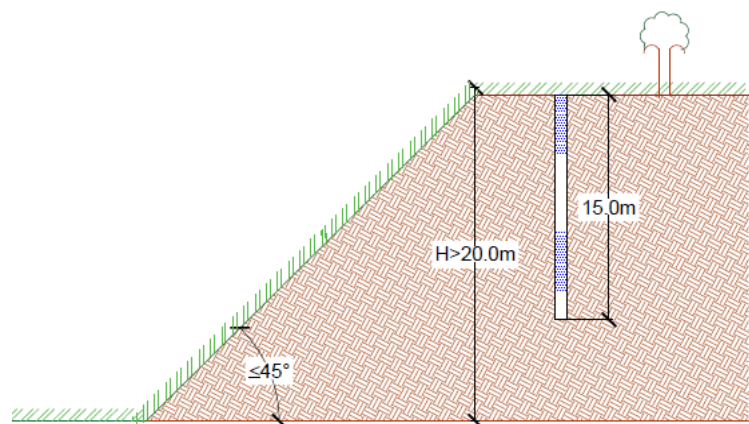
Esta normativa únicamente establece un lineamiento para definir la cantidad y profundidad de sondeos, ya que considera conveniente realizar un mínimo de tres perforaciones para el análisis del talud, y la profundidad será de 1.5 veces la altura del talud de al menos la mitad de las perforaciones o cualquiera de las perforaciones.

- **Norma Técnica Colombiana para el Control de Erosión y para la Realización de Estudios Geológicos, Geotécnicos e hidrológicos. (2005).**

Esta normativa establece dos criterios para definir la profundidad de exploración de los sondeos:

1. El 50% de los sondeos deberán alcanzar la profundidad de 1.5 veces la diferencia de altura entre el pié y la corona del talud analizado.
2. La profundidad a explorar se determinará según la pendiente inferior del talud:
  - Taludes con pendientes inferiores o iguales a  $45^\circ$  y con una altura mayor a 20.0 m, la profundidad a explorar de los sondeos es de 15.0 m, siempre y cuando el suelo o roca a esta profundidad sean de características geológicas y geotécnicas que garanticen la estabilidad, como se ilustra en la figura No.4.22.

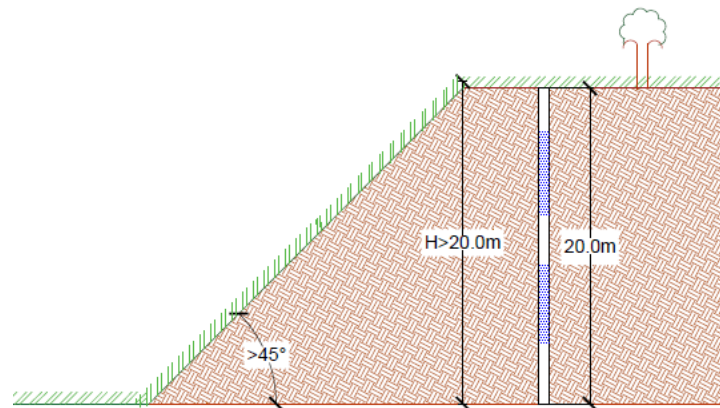
**Figura No.4.22** Profundidad a explorar para taludes con pendientes  $\leq 45^\circ$



FUENTE: Norma Técnica Colombiana para el Control de Erosión y para la Realización de Estudios Geológicos, Geotécnicos e hidrológicos. (2005). Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

- Taludes con pendientes superiores al  $45^\circ$  y con una altura mayor a 20.0 m, la profundidad a explorar de los sondeos es de 20.0 m, siempre y cuando el suelo o roca a esta profundidad sean de características geológicas y geotécnicas que garanticen la estabilidad, como se ilustra en la figura No.4.23.

**Figura No.4.23** Profundidad a explorar para taludes con pendientes  $>45^\circ$



FUENTE: Norma Técnica Colombiana para el Control de Erosión y para la Realización de Estudios Geológicos, Geotécnicos e hidrológicos. (2005). Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

Luego de plantear los requerimientos mínimos de número, espaciamiento y profundidad definidos por diferentes literaturas, normativas y/o códigos internacionales para las perforaciones en muros de retención, se elaboró la tabla resumen No.4.45.

**TABLA No. 4.45.** Resumen de requerimientos mínimos para taludes.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, GEOTECHNICAL ENGINEERING, DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, AÑO 2003			
LONGITUD DE SOIL NAILING	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
$\geq 30.0$ m	No define	30.0 - 60.0 m a lo largo de la línea central del muro	

<30.0 m		Al menos una perforación a lo largo de la línea central del muro	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las perforaciones traseras del soil nailing y a lo largo de este se deberán profundizar al menos dos veces la altura de pared completa del nailing a partir de la corona del talud.</li> <li>Las perforaciones frontales de la pared deberán profundizarse la altura del muro.</li> </ul>
Enfrente de la pared del muro		60.0 m a lo largo de la línea central de la pared del muro.	
Detrás de la pared del muro		30.0 a 45.0 m a lo largo de la línea central de la pared.	
<b>CÓDIGO DE LADERAS DISTRITO BARRANQUILLA, COLOMBIA (2007)</b>			
	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Por lo menos el 50% de los sondeos.	No define	No define	1.25 veces la diferencia de altura entre el pie y la corona del talud analizado o penetrar por lo menos cuatro metros en material firme.
<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS. (2005).</b>			
<b>GENERAL</b>	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
50% de los sondeos	-	-	1.5 la altura del talud
<b>PENDIENTE INFERIOR DEL TALUD</b>			
$\leq 45^\circ$ y $H > 20.0$ m	No define	No define	15.0
$> 45^\circ$ y $H > 20.0$ m			20.0
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL” (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
<b>GENERAL</b>	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Según longitud del talud	3	Sondeos serán a cada 15.0 m a 25.0 m, a lo largo de la corona, cuerpo y pie del talud.	No define
<b>CÓDIGO GEOTÉCNICO DE TALUDES Y LADERAS DE COSTA RICA (2015). COLEGIO FEDERADO DE INGENIEROS Y ARQUITECTOS</b>			
	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Por lo menos el 50% de los sondeos.	3	No define	1.5 veces la altura del talud

FUENTE: De los autores.

## ENTREVISTAS A ESPECIALISTAS EN EL ÁREA DE GEOTECNIA.

Con el objetivo de conocer los criterios geotécnicos para definir los requerimientos mínimos para las obras de protección (gaviones y soil nailing), se realizaron visitas a las empresas geotecnista, donde se obtuvo poca información para estas estructuras. La tabla No. 4.46 muestra un cuadro comparativo de los requerimientos mínimos para gaviones y soil nailing.

**TABLA No. 4.46.** Cuadro comparativo de requerimientos mínimos para obras de protección.

OBRAS DE PROTECCIÓN	
<p style="text-align: center;"><b>GAVIONES</b></p> <p>Se realizan sondeos a una profundidad de 5.0 m, debido a que los gaviones distribuyen mejor la carga por ser muros flexibles no requieren sondeos SPT, estos se han realizado por solicitud del constructor.</p>	<p style="text-align: center;"><b>GAVIONES</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Profundidad: 6.0 m</li> <li>• Espaciamiento: cada 15.0 m.</li> <li>• El nivel de desplante recomendado es de 0.3 - 0.5 m, con el objetivo de generar una condición de empotramiento y que la estructura no se desplace con las aceleraciones generadas por un sismo. Sin embargo, pueden trabajar sin nivel de desplante.</li> <li>• Debido a su flexibilidad, se utiliza un colchón reno como cimentación.</li> <li>• Los requerimientos geotécnicos para este tipo de estructura se desarrollan de la misma manera que un muro flexible o rígido.</li> <li>• Altura máxima recomendada de 6.0 m.</li> <li>• No es recomendable su uso en quebradas de los ríos.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>SOIL NAILING</b></p> <p>Se recomienda realizar pozos a cielo abierto para un muestreo inalterado para realizar ensayos triaxiales, posteriormente un análisis de estabilidad de taludes para determinar la cuña de falla y establecer la longitud de anclaje del soil nailing, se debe embeber 1/3 de la longitud de anclaje del soil nailing después de la cuña de falla.</p>	<p style="text-align: center;"><b>SOIL NAILING</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se recomienda realizar exploraciones rotativas en la corona del talud las cuales atraviesen todo el cuerpo del talud para conocer las propiedades del suelo donde se anclará el nailing.</li> <li>• Se colocan sondeos en la corona y al pie de talud, lo ideal es realizar un sondeo intermedio para ver la distribución de estratos en medio del talud, sin embargo, existen limitaciones físicas (montaje de equipo).</li> <li>• El espaciamiento de los sondeos es de 15.0 m a 20.0 m linealmente a lo largo del talud.</li> </ul>

FUENTE: De los autores.

## **5.0 CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

El presente capítulo se dividirá en tres etapas para realizar el análisis de resultados: la primera etapa consistirá en realizar un análisis del contenido de los informes geotécnicos, la segunda en el análisis de resultados de los mapas de características geotécnicas y la tercera etapa en la elaboración de la propuesta de requerimientos mínimos.

Para la primera etapa se realiza un análisis del contenido de los informes geotécnicos realizados en el área de estudio, resaltando aspectos que deben mejorarse.

Luego se realiza un análisis de los resultados obtenidos, producto de las interpolaciones de los datos para cada uno de los mapas de características geotécnicas, siendo estos: curvas de contenidos de humedad en época seca y lluviosa, compacidad y clasificación de suelos, para profundidades de dos y cinco metros. Se presentan gráficos de barras de los mapas para facilitar la comprensión del análisis de resultados.

Finalmente se establecen lineamientos mínimos de número, cantidad y profundidad de sondeos para urbanizaciones, obras de protección y edificaciones de tres y más niveles, por medio de la revisión de normativas internacionales, literatura geotécnica y entrevistas a especialistas en el área de geotecnia.

## 5.2 ESTUDIOS DE SUELOS

Durante la etapa de elaboración de la base de datos, se observaron algunas debilidades en los estudios de suelos elaborados por las diferentes empresas geotécnicas, dificultando así la elaboración de la misma. Dentro de los más destacados tenemos:

- La mayoría de los estudios de suelos no presentan una Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- No se especifica la correlación que se utiliza para determinar las propiedades mecánicas del suelo (ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo), ni cómo se determina el peso volumétrico.
- La mayoría de los estudios no determinan el  $N_{\text{corregido}}$ , y aquellos que lo hacen, no presentan en detalle los factores de corrección que han considerado.
- Cada empresa utiliza teorías diferentes para determinar las compacidades/consistencias de los suelos.
- La mayoría no presenta memoria de cálculo para determinar la capacidad de carga definida en el estudio geotécnico.
- No se tiene claro las características de la obra para la cual se proyecta el estudio.

### 5.3 ANÁLISIS DEL MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.

#### **Generalidades:**

Para la elaboración del mapa, se evaluaron de forma independiente, el comportamiento que presentaban las propiedades geotécnicas (humedades, compacidad y tipos de suelos) en profundidad, determinándose tomar como profundidades de análisis, la de dos y cinco metros, cuya justificación se plantea a continuación:

La profundidad de dos metros permite conocer las condiciones del suelo superficialmente, considerando que el nivel de desplante generalmente utilizado para la construcción de viviendas de uno y dos niveles es de 1.50 m de profundidad. En el caso de la profundidad de cinco metros, se definió como el estrato que presentaba mayor porcentaje de información y concentración de puntos para generar mapas representativos (entre mayor cantidad de puntos se tienen las interpolaciones realizadas son más precisas).

Tomando en cuenta estas consideraciones, se elaboraron tres mapas a profundidades de dos y cinco metros, cada uno con propiedades geotécnicas diferentes:

- Mapa de curvas de contenido de humedad en estación seca y lluviosa.
- Mapa de compacidad de suelos.
- Mapa de clasificación de suelos.



### **Consideraciones del software para la generación de los mapas**

Para la generación de los mapas se utilizó el software ArcGIS, el que contiene varios tipos de interpolación, de los cuales se utilizó el método de interpolación *Topo to Raster* para modelar los mapas de contenido de humedades y el mapa de compacidad de suelos, ya que este método está diseñado para crear modelos digitales en los cuales se conoce la variable de elevación.

Para la modelación del mapa de clasificación de suelos, se utilizó la metodología de interpolación *Kriging Bayesiano Empírico (EBK)*, ya que ésta presenta resultados más representativos del fenómeno estudiado (coherente con la geología de la zona).

En el siguiente apartado se realizará un análisis de los resultados de los mapas de contenido de humedad para la estación seca y lluviosa, compacidad y tipo de suelos, para las profundidades de análisis.

#### **5.3.1 MAPAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD**

Para realizar el análisis de los resultados, se presenta de manera ordenada el análisis para cada uno de los mapas a las profundidades estudiadas.

Los aspectos que se abarcarán serán los siguientes:

- Profundidad de análisis.
- Comportamiento de la humedad tanto en estación seca como lluviosa.

Se realizó un análisis estadístico con base a la población de datos, lo que permitió elaborar gráficos comparativos, tanto para la estación seca como lluviosa para la misma profundidad, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los resultados obtenidos. En los gráficos de humedades se ha identificado a la estación seca mediante barras achuradas, caso contrario para la estación lluviosa, la cual presenta un color sólido. Ver figura No. 5.1

- **Análisis de contenidos de humedades para la estación seca y lluviosa a dos metros de profundidad.**

La base de datos para los contenidos de humedad a una profundidad de dos metros contiene un total de 2,191 puntos, de los cuales el 45% y 55% corresponden a valores de humedades en estación seca y lluviosa respectivamente. En la tabla No.5.1 se muestran los porcentajes para los rangos de contenido de humedad que se utilizaron para generar los mapas en estación seca y lluviosa (Figuras Nos. 5.2 y 5.3) a una profundidad de dos metros.

**TABLA No.5. 1** Porcentaje de variación de humedades en estación seca y lluviosa a dos metros de profundidad.

TOTAL DE PUNTOS	RANGOS DE HUMEDADES	NÚMERO DE PUNTOS	PORCENTAJE
<b>ESTACIÓN SECA</b>			
<b>982</b>	0-10%	70	3.2%
	10.01-20%	298	13.6%
	20.01-30%	434	19.8%
	30.01-40%	156	7.1%
	40.01-50%	24	1.1%
<b>ESTACIÓN LLUVIOSA</b>			
<b>1,209</b>	0-10%	115	5.2%
	10.01-20%	333	15.2%
	20.01-30%	436	19.9%
	30.01-40%	281	12.8%
	40.01-50%	44	2.0%
<b>2,191</b>			

FUENTE: De los autores.

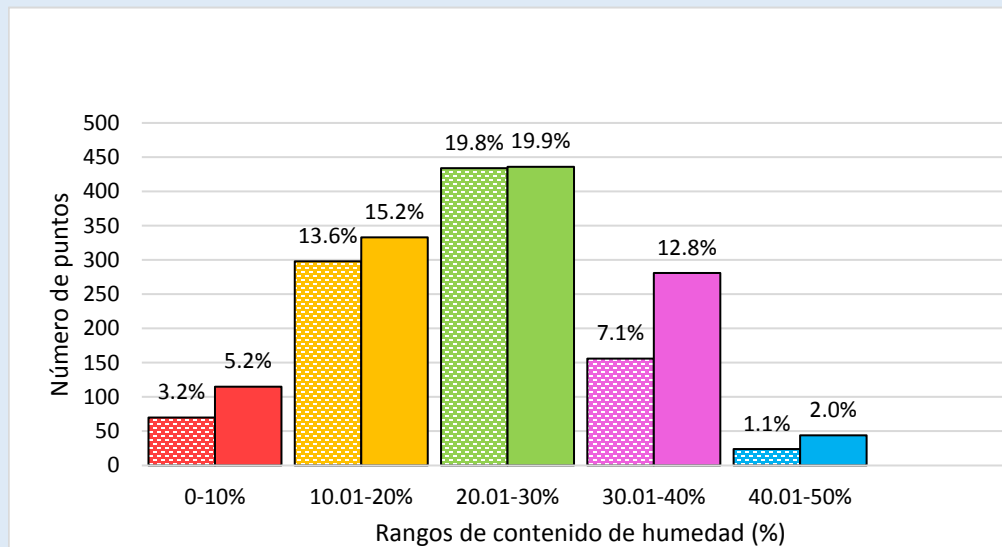
A partir de los resultados definidos en la tabla No. 5.1 se elaboró el análisis del comportamiento de las humedades en estación seca y lluviosa a una profundidad de dos metros, como se puede observar en la tabla No. 5.2, en la misma se presenta un gráfico de barras que muestra la variación de estas humedades.

(figura No. 5.1)

**TABLA No. 5.2** Análisis del mapa de contenido de humedad a dos metros de profundidad.

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CONTENIDO DE HUMEDAD PARA AMBAS ESTACIONES A DOS METROS DE PROFUNDIDAD**

**Figura No.5.1** Gráfico del comportamiento de contenido de humedad para estación seca y lluviosa a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores.

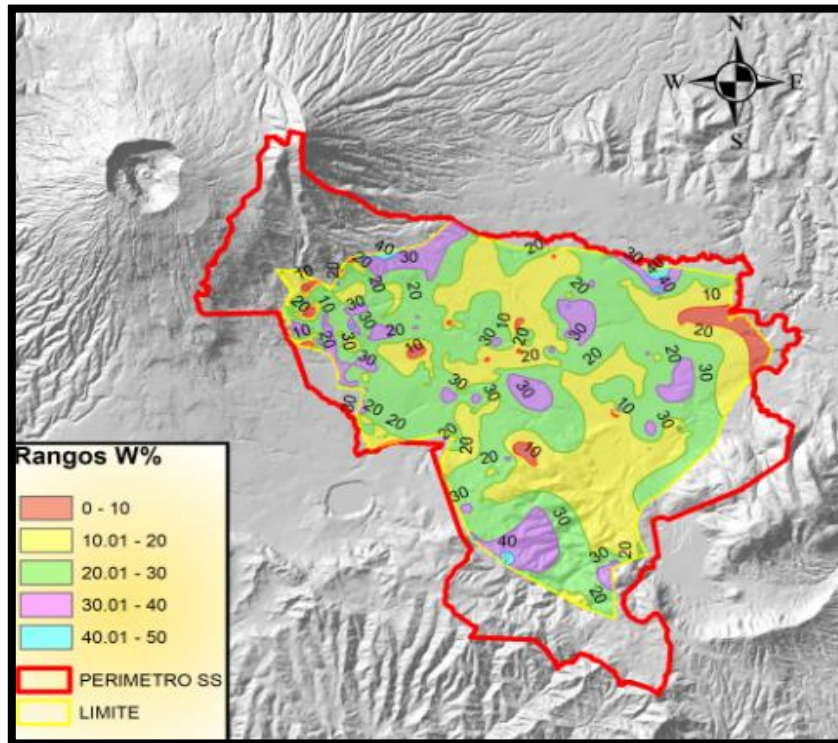
Al realizar el análisis del gráfico de la figura No.5.1 se puede observar lo siguiente:

- El rango de contenidos de humedades predominantes es del 20.01 al 30% para ambas estaciones, se observa que la diferencia entre estaciones es mínima, siendo esta del 0.1%.
- El segundo rango predominante de contenidos de humedad es del 10.01 al 20%, los cuales representan el 13.6% y 15.2% respectivamente, siendo la diferencia entre estaciones de 1.6%.
- Para los rangos de contenido de humedades entre del 30.01 a 40% se observa que en la estación lluviosa existe un incremento de la humedad del 5.7% respecto a la estación seca.
- La presencia de humedades máximas del rango del 40.01 al 50% se presentan en menor cantidad, correspondiendo a 1.1% en estación seca y el 2.0% en estación lluviosa. Lo que evidencia, pocos cambios entre ambas estaciones.
- En general, se observa que, para ambas estaciones, no se tienen cambios importantes, en la variación de los contenidos de humedades para esta profundidad.

FUENTE: De los autores.

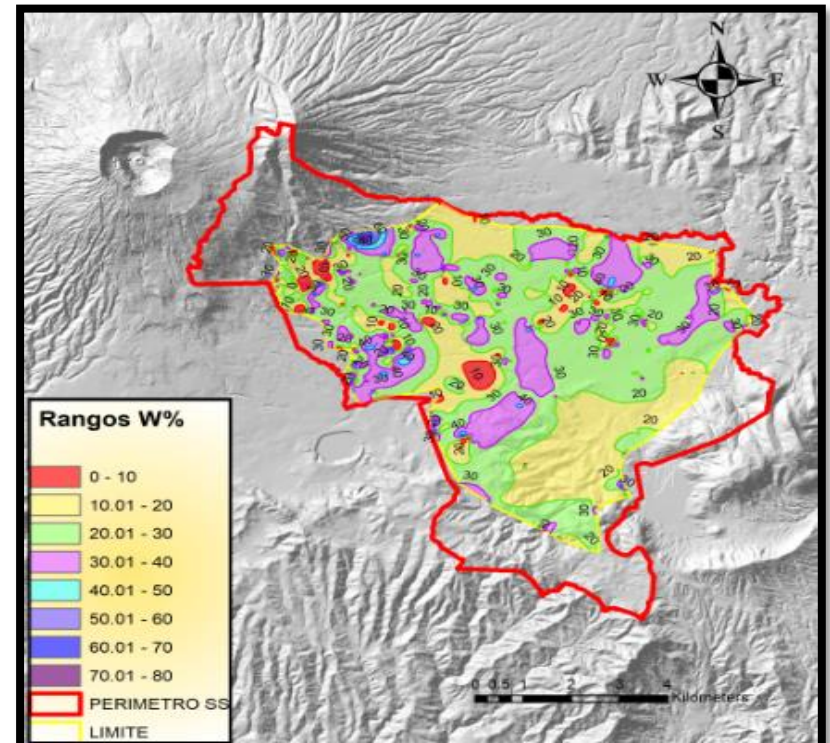
Lo descrito anteriormente se puede observar en las figuras Nos. 5.2 y 5.3, donde los colores predominantes son el amarillo y verde, que corresponden a rangos de humedades entre 10-30%, además se observa que en el mapa de estación lluviosa existe una mayor cantidad de zonas con humedades del 30.01-40% (color morado) y las zonas con humedades altas de 40.01-50% (color celeste) para ambas estaciones se presentan en menor cantidad.

**Figura No.5.2.** Mapa de curvas contenido de humedad en estación seca a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores

**Figura No.5.3.** Mapa de curvas contenido de humedad en estación lluviosa a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores

- **Análisis de contenidos de humedades para la estación seca y lluviosa a cinco metros de profundidad.**

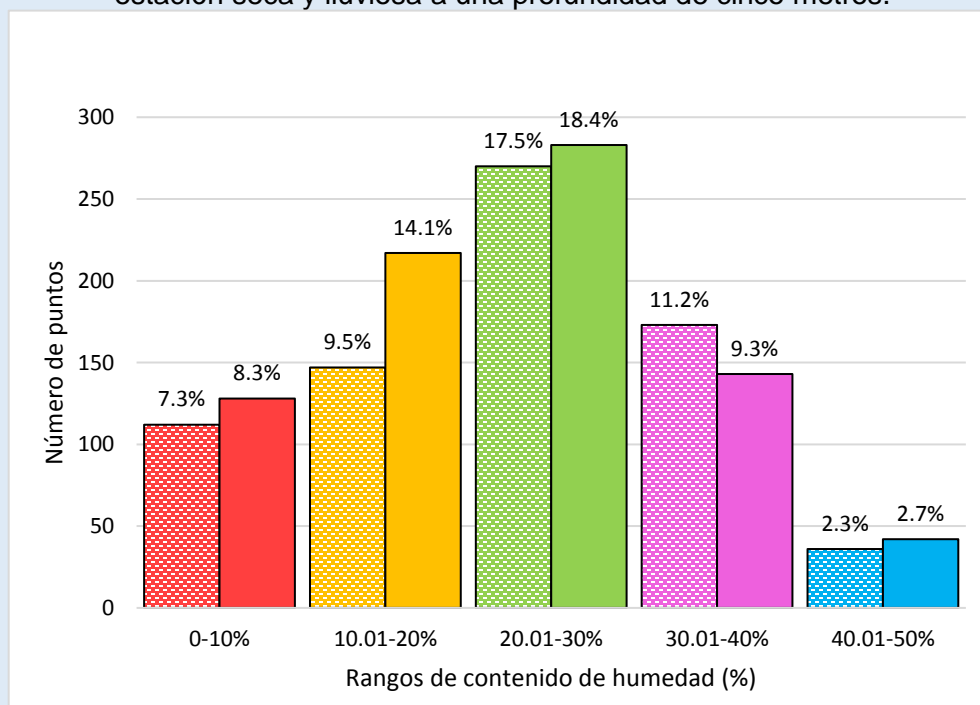
Para la profundidad de cinco metros la base de datos contiene un total de 1,541 puntos para contenidos de humedad, de los cuales el 46% y 54% corresponden a valores de humedades para estación seca y lluviosa respectivamente. En la tabla No.5.3 se representan los porcentajes para los rangos de los contenidos de humedad que se utilizaron para modelar los mapas para estación seca y lluviosa (Figuras Nos. 5.5 y 5.6).

**TABLA No.5.3** Porcentajes de variación de humedades en estación seca y lluviosa a cinco metros de profundidad.

TOTAL DE PUNTOS	RANGOS DE HUMEDADES	NÚMERO DE PUNTOS	PORCENTAJE
<b>ESTACIÓN SECA</b>			
<b>713</b>	0-10%	112	7.3%
	10.01-20%	147	9.5%
	20.01-30%	270	17.5%
	30.01-40%	173	11.2%
	40.01-50%	36	2.3%
<b>ESTACIÓN LLUVIOSA</b>			
<b>828</b>	0-10%	128	8.3%
	10.01-20%	217	14.1%
	20.01-30%	283	18.4%
	30.01-40%	143	9.3%
	40.01-50%	42	2.7%
<b>1,541</b>			

FUENTE: De los autores.

Con base a los resultados de los porcentajes definidos en la tabla No.5.3, se elaboró un análisis del gráfico de barras (figura No. 5.4) de la variación de humedades para la estación seca y lluviosa a la profundidad en estudio, como se muestra en la tabla No. 5.4.

**TABLA No. 5.4** Análisis del mapa de contenido de humedad a cinco metros de profundidad.**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE CONTENIDO DE HUMEDAD PARA AMBAS ESTACIONES A CINCO METROS DE PROFUNDIDAD****Figura No.5.4** Gráfico del comportamiento de contenido de humedad para estación seca y lluviosa a una profundidad de cinco metros.

FUENTE: De los autores.

Al realizar un análisis del gráfico de la figura No.5.4 se puede observar lo siguiente:

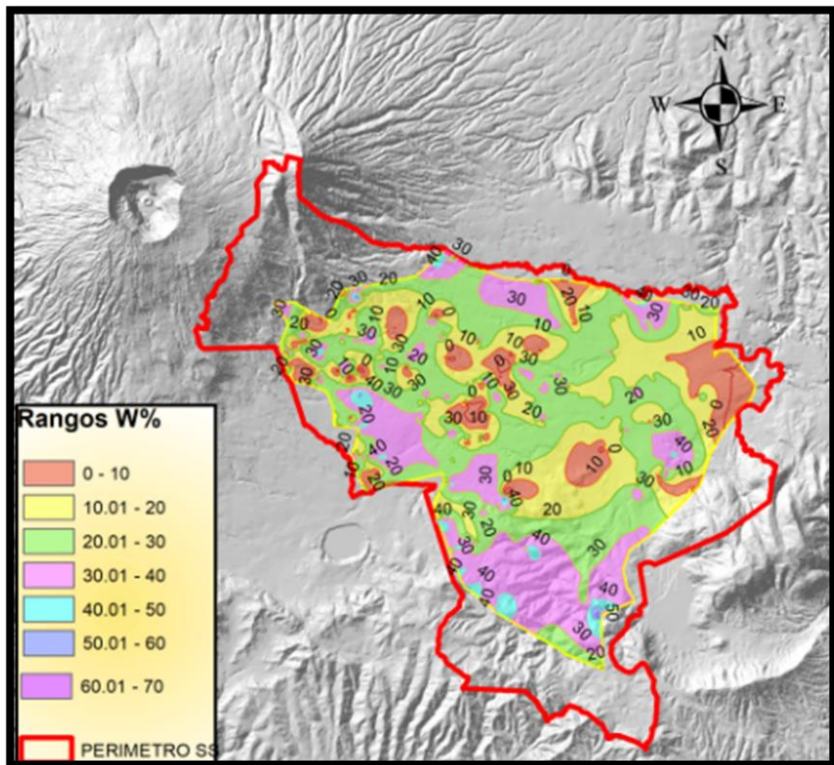
- El rango de contenidos de humedades que predomina es del 20.01 al 30% para ambas estaciones, se observa que la diferencia entre la estación seca y lluviosa es mínima siendo del 0.9%.
- El segundo rango predominante del contenido de humedad es del 10.01 al 20% para ambas estaciones, los cuales representan el 9.5% y 14.1%.
- El tercer rango predominante del contenido de humedad es del 30.01 al 40% representando el 11.2% en estación seca y el 9.3% para la estación lluviosa.
- Las humedades máximas del 40.01 al 50% representan el 2.3% en estación seca y el 2.7% para la estación lluviosa.
- En general se observa que para ambas estaciones se presenta una misma tendencia en la variación de los contenidos de humedades para la profundidad de cinco metros.

FUENTE: De los autores.



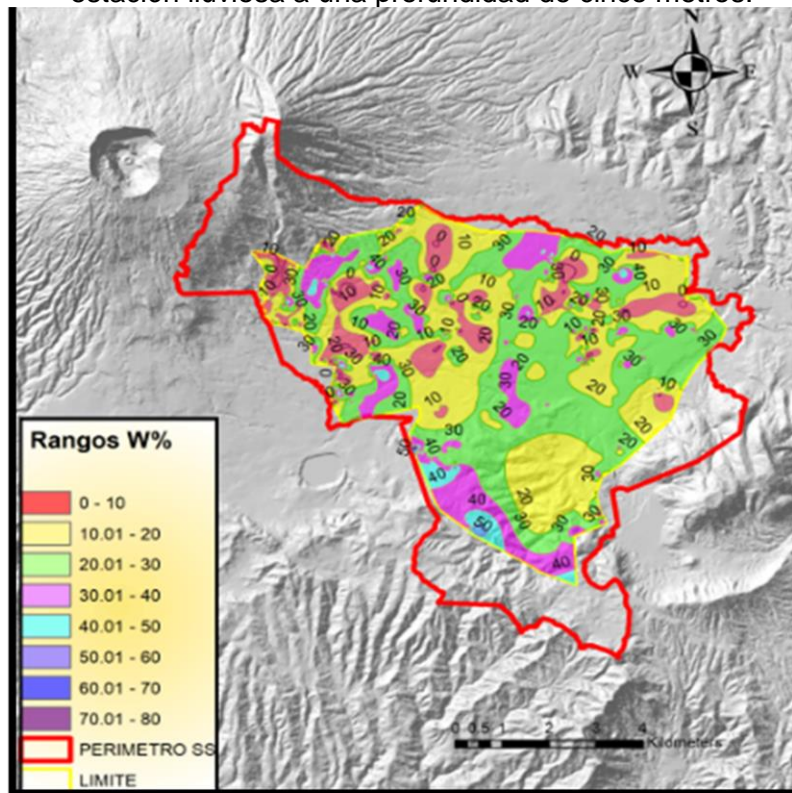
De lo planteado anteriormente se puede observar que en las figuras Nos. 5.5 y 5.6, los colores predominantes son el amarillo y verde, correspondientes a los rangos de humedades del 10 al 30%. Las zonas con humedades altas del 40.01-50%(color celeste) se presentan en menor cantidad en el área de estudio para ambas estaciones.

**Figura No.5.5** Mapa de curvas contenido de humedad en estación seca a una profundidad de cinco metros.



FUENTE: De los autores

**Figura No.5.6** Mapa de curvas contenido de humedad en estación lluviosa a una profundidad de cinco metros.



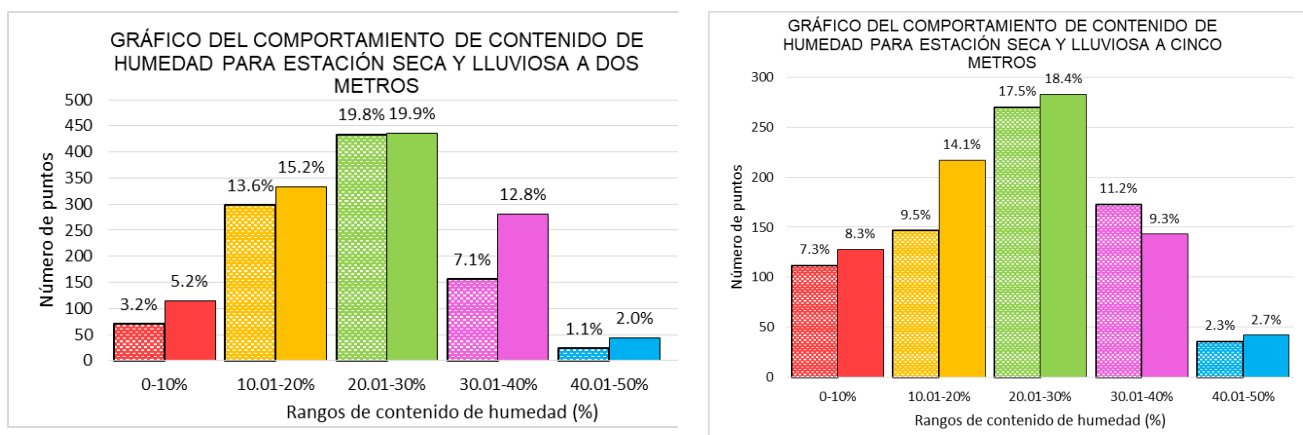
FUENTE: De los autores



- **Análisis de resultados para las profundidades de dos y cinco metros.**

Con base al análisis realizado anteriormente, en la figura No.5.7 se puede observar que, no existe variaciones importantes en el comportamiento de las humedades para las profundidades de dos y cinco metros en ambas estaciones, y que el rango de humedades que predominan para las profundidades analizadas se encuentra entre el 10 al 30%, para ambas estaciones.

**Figura No.5.7** Comparación de gráficos de humedades para las profundidades de dos y cinco metros



FUENTE: De los autores

### 5.3.2 MAPAS DE COMPACIDAD DE SUELOS

Estos mapas se elaboraron a partir de los  $N_{campo}$  presentados en los estudios de suelos; para lo cual fue necesario definir rangos de compacidades de suelos: sueltas (0 a 10 golpes), medianas (11 a 30 golpes) y densas (31 a 50 golpes).

Los aspectos que se abarcarán serán los siguientes:

- Profundidad de análisis.
- Comportamiento de las compacidades de los suelos.

En la tabla No. 5.5 se realizó un análisis estadístico de los porcentajes que representan cada una de las compacidades de los suelos a las profundidades de análisis, luego los resultados se plasmaron en un gráfico de barras para una mejor comprensión, estos se comparan con los mapas de compacidad de suelos, para realizar su respectivo análisis.

**TABLA No.5.5** Porcentajes de compacidades de suelos para las profundidades de análisis.

TOTAL DE PUNTOS	PROFUNDIDAD (m)	COMPACIDAD	NÚMERO DE PUNTOS	PORCENTAJE (%)
2,243	2.0	SUELTO	555	25
		MEDIANA	1084	48
		DENSA	604	27
1,389	5.0	SUELTO	161	12
		MEDIANA	738	53
		DENSA	490	35

FUENTE: De los autores.

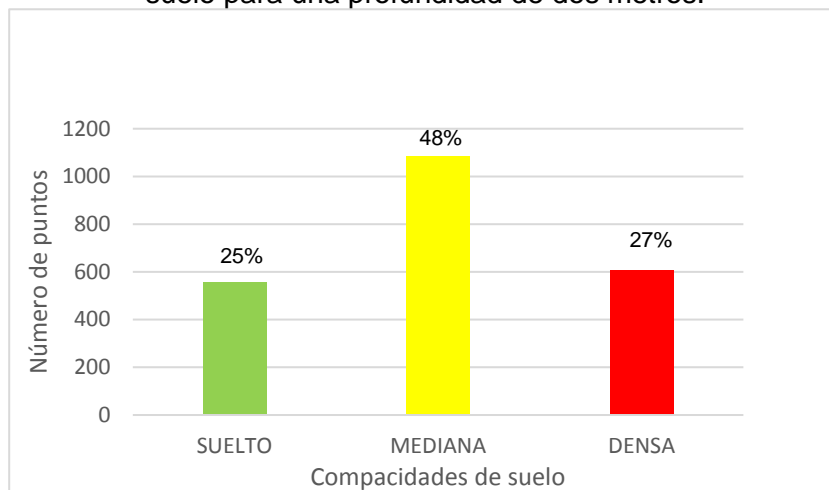
- **Compacidad de los suelos a una profundidad de dos metros.**

Se elaboró un análisis del comportamiento de la compacidad del suelo (tabla No. 5.6), donde se observa que de los resultados de la figura No. 5.8 concuerdan con el mapa de la figura No. 5.9.

**TABLA No. 5.6** Análisis del comportamiento de compacidades del suelo a dos metros de profundidad.

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE COMPACIDADES DEL SUELO A DOS METROS DE PROFUNDIDAD**

**Figura No.5.8** Gráfico del comportamiento de compacidades del suelo para una profundidad de dos metros.

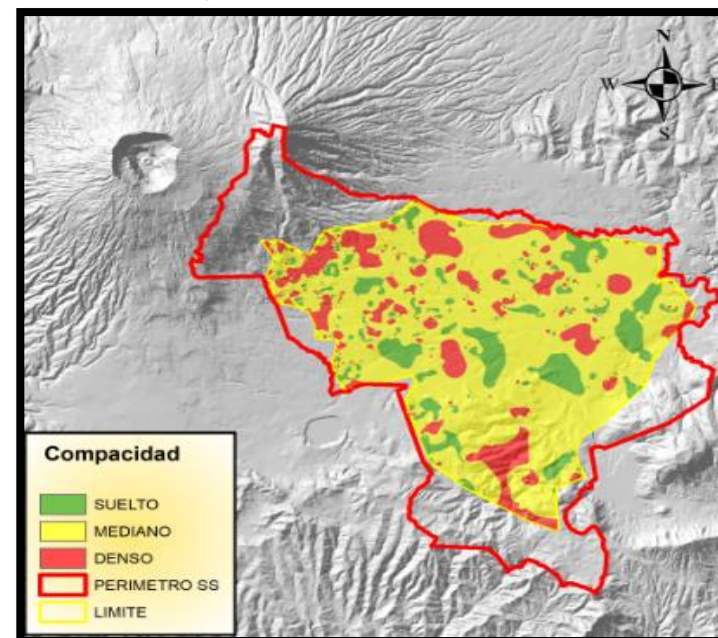


FUENTE: De los autores

Del gráfico de la figura No.5.8 se puede observar lo siguiente:

- Para el área de estudio el 48% de los suelos presenta una compacidad mediana.
- Las compacidades sueltas y densas se encuentran en una proporción similar, las cuales representan el 25% y 27% respectivamente.

**Figura No.5.9** Mapa de compacidad de los suelos a una profundidad de dos metros.



FUENTE: De los autores

En el mapa predomina el color amarillo correspondiente a suelos con compacidad mediana, seguido de los colores rojo (denso) y verde (suelto) en proporción similar.

FUENTE: De los autores

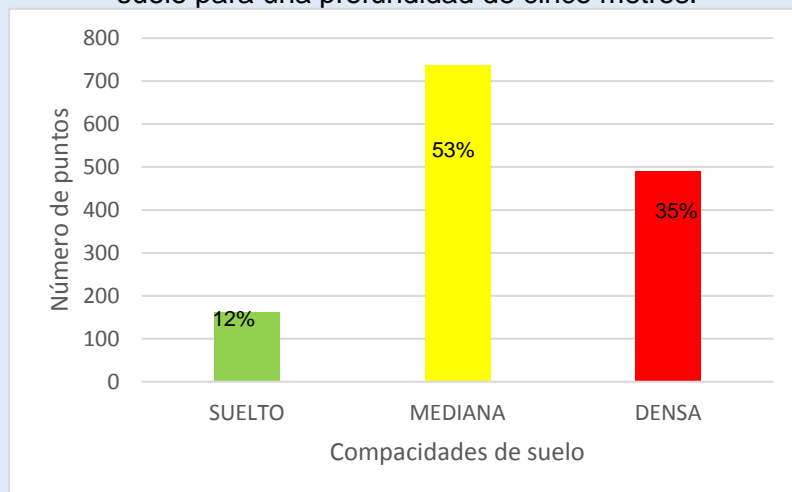
- **Compacidad de los suelos a una profundidad de cinco metros.**

En la tabla No. 5.7 se realiza un análisis, donde se puede observar que los resultados del gráfico de barras de la figura No. 5.10 coinciden con lo plasmado en el mapa de la figura No. 5.11, donde predominan compacidades medianas, seguidas de las densas.

**TABLA No. 5.7** Análisis del comportamiento de compacidades del suelo a cinco metros de profundidad.

### ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE COMPACIDADES DEL SUELO A CINCO METROS DE PROFUNDIDAD

**Figura No.5.10** Gráfico del comportamiento de compacidades de suelo para una profundidad de cinco metros.

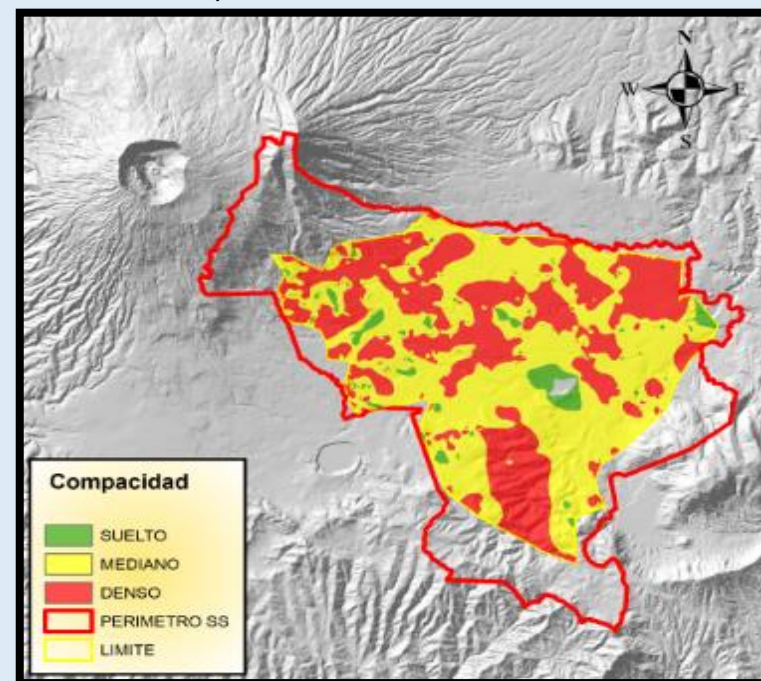


**FUENTE: De los autores**

Del gráfico de la figura No.5.10 se puede observar lo siguiente:

- La compacidad mediana representa la mayor cantidad, siendo esta del 53%.
- El 35% presenta zonas con compacidades densas.
- Un 12% presenta compacidades sueltas.

**Figura No.5.11** Mapa compacidad de los suelos a una profundidad de cinco metros.



**FUENTE: De los autores**

En el mapa predomina la compacidad media representada por color amarillo y se puede observar que hay zonas significativas de color rojo que representan compacidades densas.

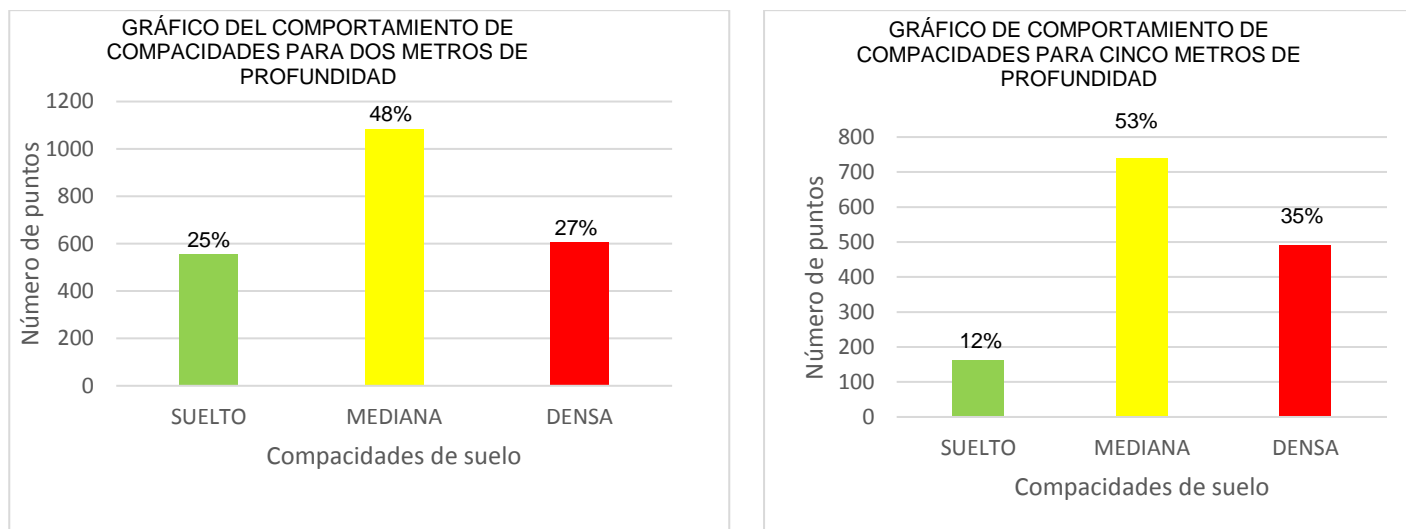
**FUENTE: De los autores**

- **Análisis de resultados de las compacidades para ambas profundidades.**

Al comparar los resultados de los gráficos y de los mapas de compacidades a dos y cinco metros (figura No.5.12), se puede determinar lo siguiente:

- Un aumento del 8% en las zonas con compacidades densas a la profundidad de cinco metros.
- Una disminución de las compacidades sueltas, del 13% en comparación a la profundidad de cinco metros.
- Un aumento de las compacidades medianas, del 5% en comparación a la profundidad de 5.0m.

**Figura No.5.12** Comparación de gráficos para las profundidades de dos y cinco metros.



FUENTE: De los autores

En la zona de estudio a las profundidades de análisis, prevalecen las compacidades medianas (11 a 30 golpes), además para profundidades de dos metros existen mayores zonas sueltas (0 a 10 golpes) y para cinco metros se presentan mayores zonas con compacidades densas (31 a 50 golpes).

### 5.3.3 MAPA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Para el análisis de resultados de los mapas, se seleccionaron las clasificaciones de suelos con mayor población de datos a profundidades de dos y cinco metros. Los aspectos que se abarcarán serán los siguientes:

- Profundidad de análisis.
- Suelos predominantes del área de estudio según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
  - **Análisis de clasificación de suelos a dos metros de profundidad.**

En la tabla No. 5.8 se presenta un análisis estadístico de los porcentajes de tipos de suelos a la profundidad de dos metros, donde las clasificaciones más representativas de toda la población de datos fueron: limos arenosos (ML), arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), arenas (S) y gravas (G).

Sin embargo, debido a la cantidad de puntos, al modelar el mapa el programa no refleja los suelos SC Y G, por lo que se decidió incluir las SC en las S y las G no se tomaron en cuenta, debido a que están en menor porcentaje. (Ver tabla No. 5.9).

**TABLA No. 5.8** Porcentajes de suelos a la profundidad de dos metros.

<b>CLASIFICACIÓN A DOS METROS</b>	<b>CANTIDAD DE PUNTOS</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
<b>ML</b>	1,063	51
<b>SM</b>	804	38
<b>SC</b>	146	7
<b>S</b>	54	3
<b>G</b>	19	1
<b>TOTAL</b>	<b>2086</b>	<b>100</b>

FUENTE: De los autores

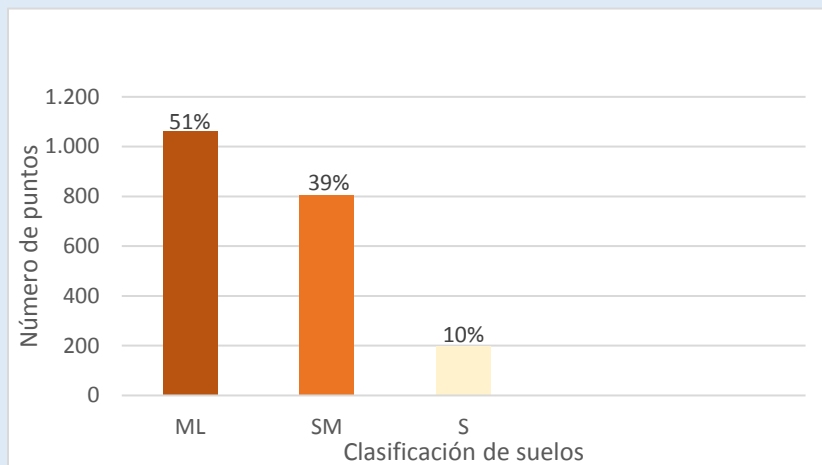
**TABLA No. 5.9** Porcentajes de suelos a la profundidad de dos metros.

<b>CLASIFICACIÓN A DOS METROS</b>	<b>CANTIDAD DE PUNTOS</b>	<b>PORCENTAJE (%)</b>
<b>ML</b>	1,063	51
<b>SM</b>	804	39
<b>S</b>	200	10
<b>TOTAL</b>	<b>2067</b>	<b>100</b>

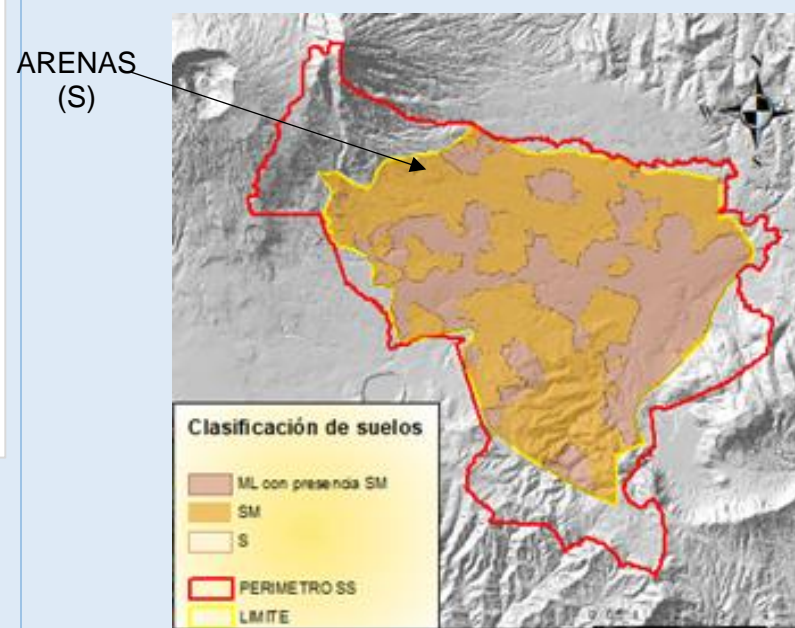
FUENTE: De los autores

A partir de los porcentajes obtenidos en la tabla No.5.9 se elaboró un gráfico de barra (figura No. 5.13) que presenta los suelos predominantes en al área de estudio, estos se compararon con el mapa de la figura No.5.14, para realizar su respectivo análisis, como se observa en la tabla No. 5.10.



**TABLA No.5.10** Análisis de clasificación de suelos a dos metros de profundidad.**ANÁLISIS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS A DOS METROS DE PROFUNDIDAD****Figura No. 5.13** Gráfico de clasificación de suelos a dos metros de profundidad

FUENTE: De los autores.

**Figura No. 5.14** Mapa de clasificación de suelos a dos metros de profundidad

FUENTE: De los autores.

Al realizar el análisis se puede observar lo siguiente:

- Las clasificaciones limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM) representan el 51% y 39% respectivamente.
- La clasificación arenas (S) representan el 10%.

El color predominante es café oscuro perteneciente “ML con presencia en algunas zonas de arenas limosas SM”, seguido por las arenas limosas de color café claro y finalmente la arena de color beige (por estar en menor cuantía el mapa no logra establecer una zona específica, sin embargo, se encuentran concentradas en las faldas del volcán de San Salvador, en el costado norponiente en el mapa.)

FUENTE: De los autores.

**NOTA:**

Se identificaron zonas del mapa en las que el software ArcGIS no logro realizar una distinción entre los ML y SM, por lo que la clasificación de los limos arenosos se definió como “ML con presencia en algunas zonas de arenas limosas SM”.

- **Análisis de clasificación de suelos a cinco metros de profundidad.**

En la tabla No. 5.11 se presenta el resultado del análisis estadístico de los porcentajes de tipos de suelos a la profundidad de cinco metros, donde las clasificaciones más representativas de toda la población de datos fueron: limos arenosos (ML), arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC), arenas (S) y gravas (G).

**TABLA No.5.11** Porcentajes de tipos de suelos a una profundidad de cinco metros.

CLASIFICACIÓN A CINCO METRO	CANTIDAD DE PUNTOS	PORCENTAJE (%)
ML	475	36
SM	576	43
S	164	12
SC	101	8
G	13	1
<b>TOTAL</b>	<b>1329</b>	<b>100</b>

FUENTE: De los autores

El mapa se elaboró con tres clasificaciones de suelos, al igual que la profundidad de dos metros, estas se muestran en la tabla No. 5.12.

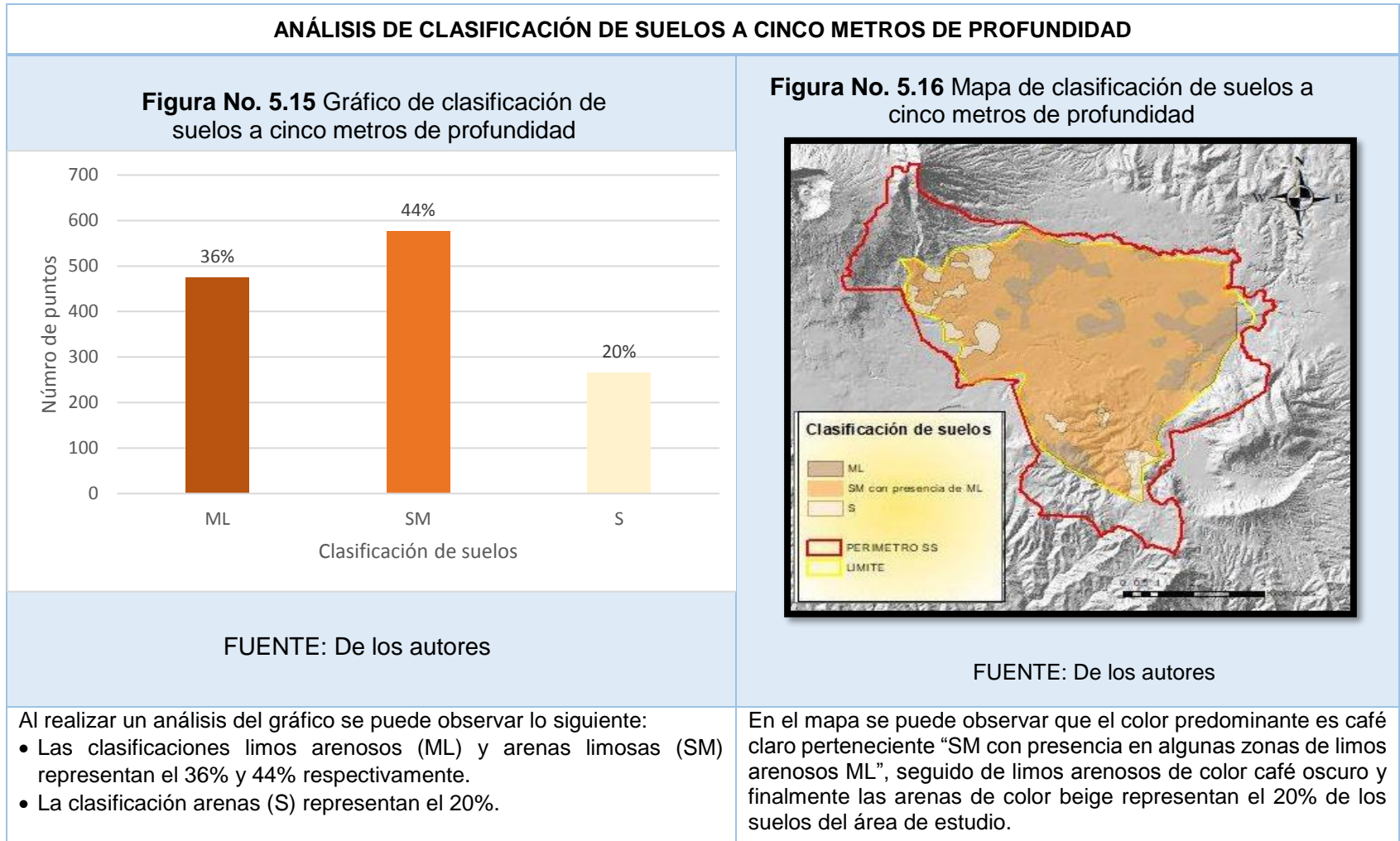
**TABLA No. 5. 12** Porcentajes de tipos de suelos a una profundidad de cinco metros.

CLASIFICACIÓN A CINCO METROS	CANTIDAD DE PUNTOS	PORCENTAJE (%)
ML	475	36
SM	576	44
S	265	20
<b>TOTAL</b>	<b>1,316</b>	<b>100</b>

FUENTE: De los autores

A partir de los porcentajes obtenidos en la tabla No.5.12 se elaboró un gráfico de barras (figura No. 5.15) de los suelos predominantes en al área de estudio, comparándolos con el mapa de la figura No.5.16. En la tabla No. 5.13 se realiza el análisis e interpretación de resultados de ambas figuras.

**TABLA No.5.13** Análisis de clasificación de suelos a cinco metros de profundidad.



FUENTE: De los autores

**NOTA:**

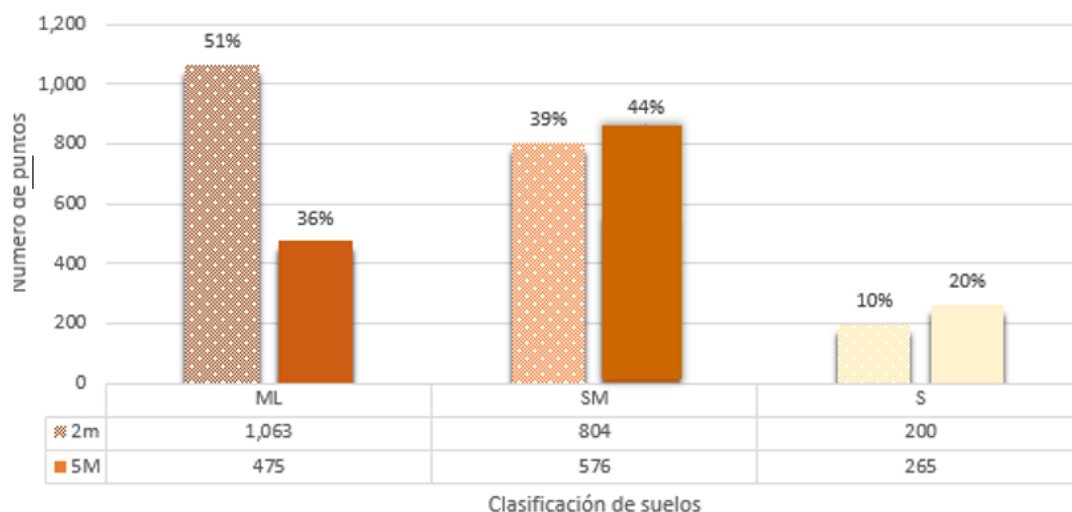
Se identificaron zonas del mapa en las que el software ArcGIS no logró realizar una distinción entre los ML y SM, por lo que la clasificación de los limos arenosos se definió como “SM con presencia en algunas zonas de limos arenosos ML”.

- **Análisis de resultados para las profundidades de dos y cinco metros.**

Con base al análisis realizado anteriormente, en la figura No.5.17 se puede determinar lo siguiente:

- Las arenas (S) aumentan en un 10% a cinco metros de profundidad.
- Disminuyen en un 15% los limos arenosos (ML) con presencia de arenas limosas (SM), a cinco metros de profundidad.
- Un aumento de las arenas limosas (SM) con presencia de (ML) del 5% en comparación a la profundidad de dos metros.
- A ambas profundidades se mantienen en mayor proporción los limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM), siendo los suelos que predominan en el área de estudio, confirmando así la geología de la zona.

**Figura No.5.17** Gráfico comparativo de clasificación de suelos a profundidades de dos y cinco metros.



FUENTE: De los autores

## 5.4 PROPUESTA DE REQUERIMIENTOS MÍNIMOS EN ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.

### 5.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES

A continuación, se presenta la propuesta de los requerimientos mínimos en estudios geotécnicos para edificaciones de tres a diez niveles, los cuales se establecen de la siguiente manera:

#### ✓ **Número y espaciamiento de sondeos**

Existen dos factores fundamentales para la planificación del espaciamiento de sondeos: tipo de edificio y variabilidad del terreno.

En general para el número y espaciamiento de sondeos se puede tomar en cuenta, los siguientes criterios:

- Estos sondeos se distribuirán uniformemente en la superficie del terreno y al menos el 70% dentro de la superficie a ocupar por el edificio.
- El espaciamiento debe ser menor en las áreas que serán sometidas a cargas pesadas y mayores en las zonas menos cargadas.
- Se debe tomar en cuenta que, si la variabilidad del terreno no presenta cambios importantes en su estratigrafía, se pueden reducir el número de perforaciones según el criterio del geotecnista.

La tabla No.5.14, presenta un resumen de los requerimientos mínimos de número y espaciamento de sondeos que se recomiendan para edificaciones de tres niveles a diez niveles.

**TABLA No. 5.14** Resumen de criterios para definir número y espaciamento de sondeos.

<b>ORTIZ-GESTA-MAZO (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, 4a. EDICIÓN.</b>			
<b>Terrenos de Variabilidad baja</b>	<b>NIVELES</b>	<b>No. MÍNIMO DE SONDEOS</b>	<b>ESPACIAMIENTO MÁXIMO (m)</b>
	<4	3	40.0 - 60.0
	4 - 10	3	35.0 - 50.0
<b>Variabilidad media</b>	<4	3	25.0 - 35.0
	4 - 10	3	
<b>Variabilidad alta</b>	<4	3	20.0 - 30.0
	4 - 10	3	20.0 - 25.0
<b>Área</b>		1/400.0 m <sup>2</sup>	-
<b>NORMA ECUATORIANA</b>			
<b>Categoría de construcción</b>	3	3	-
	4 - 10	4	-
<b>NORMA COLOMBIANA</b>			
<b>Variabilidad del suelo baja</b>	<4	3	-
	4 - 7	4	-
	8 - 14	5	-
<b>Variabilidad del suelo media</b>	<4	3	-
	4 - 7	4	-
	8 - 10	5	-
<b>Variabilidad del suelo alta</b>	<4	4	-
	4 - 7	5	-
	8 - 10	5	-
<b>NORMA COSTARRICENSE</b>			
<b>Complejidad geotécnica baja</b>	3	2	60.0
	4 - 10	2	50.0
<b>Complejidad geotécnica media</b>	3	3	40.0
	4 - 10	3	35.0
<b>Complejidad geotécnica alta</b>	3	4	30.0
	4 - 10	4	25.0
<b>NORMA TECNOLÓGICA DE CIMENTACIONES: ESTUDIOS GEOTÉCNICOS (CEG-1).</b>			
<b>Campaña I</b>	3 - 10	1 / 200.0 m <sup>2</sup>	
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
<b>ÁREA (m<sup>2</sup>)</b>	-	-	-
<b>&lt; 250.0</b>	-	4 o 5	-
<b>250.0 a 1000.0</b>	-	5	-

>1000.0	-	1/ 200.0 m <sup>2</sup>	-
<b>ESPECIALISTAS</b>			
<b>Especialista 1</b>	3 - 5	3	Radio de influencia mínimo de 6.0 m y máximo 20.0 m.
	6 - 10		
<b>Especialista 2</b>	3	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el espaciamiento se recomienda un radio de influencia mínimo que varía entre 15.0 - 20.0m dependiendo del área del terreno o proyecto.</li> <li>• Distancia máxima entre sondeo de 30.0 m.</li> </ul>
	4		
	5		
	6 - 7		
	7 - 10		

FUENTE: De los autores.

Luego de realizar un análisis comparativo de los criterios establecidos por las diferentes literaturas y normativas geotécnicas que se establecen en la tabla No. 5.14, se elaboró una propuesta de los lineamientos mínimos de número y espaciamiento de sondeos, los cuales se adaptaron a las condiciones propias del país.

#### **Propuesta de requerimientos mínimos:**

Para establecer el número y espaciamiento mínimo de sondeos se establecerá una clasificación según el número de niveles de la edificación y según la variabilidad del suelo.

Respecto al primer factor se considerara la clasificación de los edificios según su número de niveles con base a la metodología HAZUS (ver apartado 4.1) donde establece que las edificaciones en estudio tendrían un nivel de riesgo por terremoto: bajo (tres niveles), medio (cuatro a siete niveles) y alto (ocho a diez niveles). Para el segundo factor se considera lo establecido por la normativa

colombiana, variabilidad del terreno alta, media y baja, por lo que se decidió realizar una propuesta con base a estas categorías.

### **Número mínimo de sondeos**

Según los números de niveles y variabilidad de suelo, se recomienda el número mínimo de sondeos, como se observa en la tabla No.5.15:

**TABLA No.5.15** Número mínimo de sondeos.

<b>NIVELES/VARIABILIDAD</b>	<b>BAJA</b>
<b>3</b>	4
<b>4 - 7</b>	5
<b>8 - 10</b>	5

FUENTE: De los autores.

- En general como mínimo se realizarán cuatro sondeos para generar los perfiles estratigráficos, aumentando según la variabilidad del suelo y número de niveles de la edificación.
- Cuando el suelo presente condiciones problemáticas se requerirá una mayor cantidad de sondeos.
- El número de sondeos finalmente ejecutados para cada proyecto, deberá cubrir el área que ocuparán las construcciones contempladas, sin embargo, cuando se tenga presencia de taludes, deberán ser consideradas en la evaluación del comportamiento geotécnico de la estructura.
- Se recomienda para las edificaciones mayores de seis niveles, tener una relación cercana con el estructurista, ya que este es el que conoce las áreas críticas o que estarán sometidas a mayores cargas según diseño,



así como también la ubicación de la caja del elevador, donde es indispensable realizar una perforación.

### **Espaciamiento de sondeos**

- Se recomienda para tres niveles espaciamientos máximos entre 25.0 - 30.0 m, de cuatro a siete niveles entre 20.0 - 25.0 m y de ocho a diez niveles entre 15.0 - 20.0 m considerando una variabilidad del terreno baja (geológicamente). Estos sondeos se distribuirán uniformemente en la superficie del terreno concentrándolos en zonas conflictivas y al menos el 70% de los sondeos deberá estar dentro de la huella del edificio.
- El espaciamiento debe ser menor en las áreas que serán sometidas a cargas pesadas y mayor en las áreas menos críticas.
- El espaciamiento de los sondeos se reducirá si el suelo presenta una alta variabilidad (geológicamente).

### ✓ **Profundidad de sondeos**

Para este criterio es importante considerar que las edificaciones de varios niveles pueden transmitir cargas importantes, que no siempre serán transmitidas por cimentaciones superficiales, debido a lo anterior se realizó un análisis aplicando la teoría de transmisión de esfuerzos de Boussinesq y la regla empírica establecida por Sowers & Sowers para determinar la influencia de las cargas transmitidas respecto a la profundidad (para diferentes niveles de cargas), determinando así con base a este, la profundidad mínima a explorar que permita determinar el estrato resistente que servirá de apoyo.

### Teoría de Boussinesq

Para el análisis se utilizaron las siguientes ecuaciones, las cuales se explican a mayor detalle en el apartado 4.1.1.

$$\Delta\sigma' = q_o (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

Donde:

$$I = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+m^2*n^2+1} * \frac{m^2+n^2+2}{m^2+n^2+1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2+n^2+1}}{m^2+n^2+1-m^2n^2} \right),$$

$$m = \frac{B}{z}; \quad q_o = \text{Esfuerzo de contacto (esfuerzo a transmitir)}$$

B y L son las dimensiones de la zapata y z es la profundidad de interés.

$$n = \frac{L}{z}$$

Para aplicar la teoría de Boussinesq, se utilizaron diferentes secciones de cimentaciones y cargas a transmitir según número de niveles que puede presentar una edificación, las que se plasman en la tabla No 5.16.

**TABLA No. 5.16** Áreas de cimentaciones y cargas máx. en columna por niveles de edificación.

CLASIFICACIÓN HAZUS	ÁREA CIMENTACIÓN (m <sup>2</sup> )	CARGA COLUMNA (T)	NIVELES
Baja	2.0X2.0	<80.0	3
	2.5X2.5		
Media	3.0X3.0	120.0 - 260.0	4 - 7
	3.5X3.5		
Alta	4.0X4.0	300.0 - 400.0	8 - 10
	4.5x4.5		

FUENTE: De los autores

Con base a los valores mostrados en la tabla No.5.16, se procede a realizar el cálculo para la transmisión de esfuerzos para las tres categorías, se establecerá la profundidad de exploración cuando el incremento de esfuerzos represente el 10% de la carga inicial.

La tabla No. 5.17 muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo para edificaciones de categoría baja (tres niveles).

**TABLA No. 5.17** Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones  $B=L=2.0$  m y  $B=L=2.5$  m para una carga máxima en columna de 80.0 T

<b>CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN: BAJA</b>			
B=L=2.0 m Carga en columna= 80.0 T q= 2.0 kg/cm <sup>2</sup>		B=L=2.5 m Carga en columna= 80.0 T q= 1.3 kg/cm <sup>2</sup>	
PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=2.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=2.5 m
0.5	1.8597	0.5	1.2293
1.0	1.4018	1.0	1.0236
1.5	1.9683	1.5	0.7762
2.0	0.6722	2.0	0.5750
2.5	0.4819	2.5	0.4302
3.0	0.3579	3.0	0.3287
3.5	0.2744	3.5	0.2569
4.0	<b>0.2162</b>	4.0	0.2052
4.5	0.1743	4.5	0.1671
5.0	0.1432	5.0	0.1383
5.5	0.1197	5.5	<b>0.1162</b>
6.0	0.1014	6.0	0.0989

**Gráfico de incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con  $B=L=2.0$  m y con  $B=L=2.5$  m para una carga máxima en columna de 80.0 T**

The figure contains two side-by-side graphs. Both graphs plot 'Esfuerzo (kg/cm<sup>2</sup>)' on the x-axis (ranging from 0.0 to 2.0 for the left graph and 0.0 to 1.2 for the right graph) against 'Profundidad (m)' on the y-axis (ranging from 0 to 7). The left graph is for B=L=2.0 m and shows a curve starting at approximately 1.86 kg/cm<sup>2</sup> at 0.5 m depth and decreasing to 0.1014 kg/cm<sup>2</sup> at 6.0 m depth. A horizontal line is drawn at Δσ' = 0-1q at a depth of 4.0 m. The right graph is for B=L=2.5 m and shows a curve starting at approximately 1.23 kg/cm<sup>2</sup> at 0.5 m depth and decreasing to 0.0989 kg/cm<sup>2</sup> at 6.0 m depth. A horizontal line is drawn at Δσ' = 0-1q at a depth of 5.5 m.

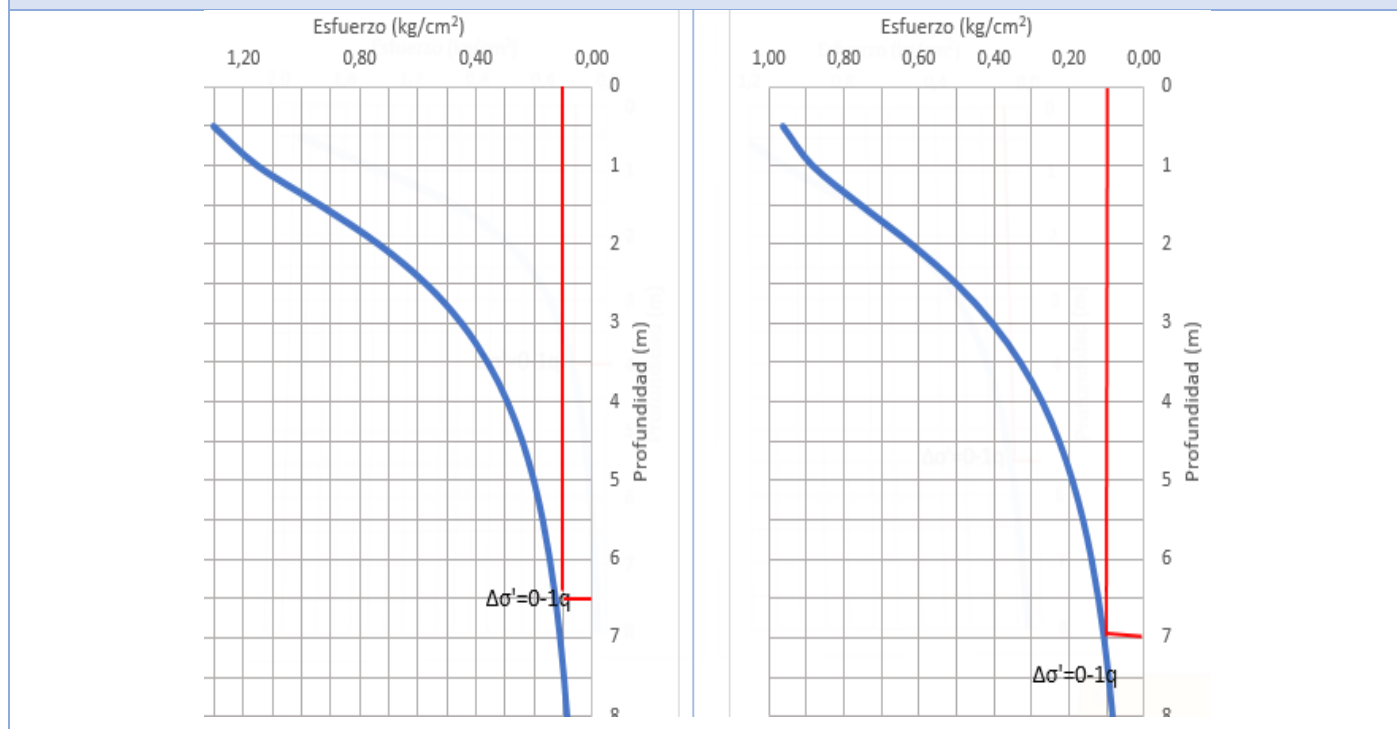
FUENTE: De los autores

En la tabla No. 5.18 se muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo para edificaciones de categoría media (cuatro niveles).

**TABLA No. 5.18** Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones  $B=L=3.0$  m y  $B=L=3.5$  m para una carga máxima en columna de 120.0 T.

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN: MEDIA							
B=L=3.0 m Carga en columna= 120.0 T q= 1.3 kg/cm <sup>2</sup>				B=L=3.5 m Carga en columna= 120.0 T q=1.0 kg/cm <sup>2</sup>			
PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.5 m	PROF. (m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.5 m
0.5	1.3010	4.5	0.2386	0.5	0.9641	4.5	0.2257
1.0	1.1502	5.0	0.1992	1.0	0.8848	5.0	0.1902
1.5	0.9345	5.5	0.1685	1.5	0.7558	5.5	0.1620
2.0	0.7318	6.0	0.1441	2.0	0.6196	6.0	0.1393
2.5	0.5700	6.5	0.1245	2.5	0.5005	6.5	0.1210
3.0	0.4481	7.0	0.1086	3.0	0.4044	7.0	0.1059
3.5	0.3575	7.5	0.0955	3.5	0.3292	7.5	0.0934
4.0	0.2898	8.0	0.0846	4.0	0.2710	8.0	0.0829

**Gráfico de incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con  $B=L=3.0$  m y  $B=L=3.5$  m para una carga máxima en columna de 120.0 T.**



FUENTE: De los autores

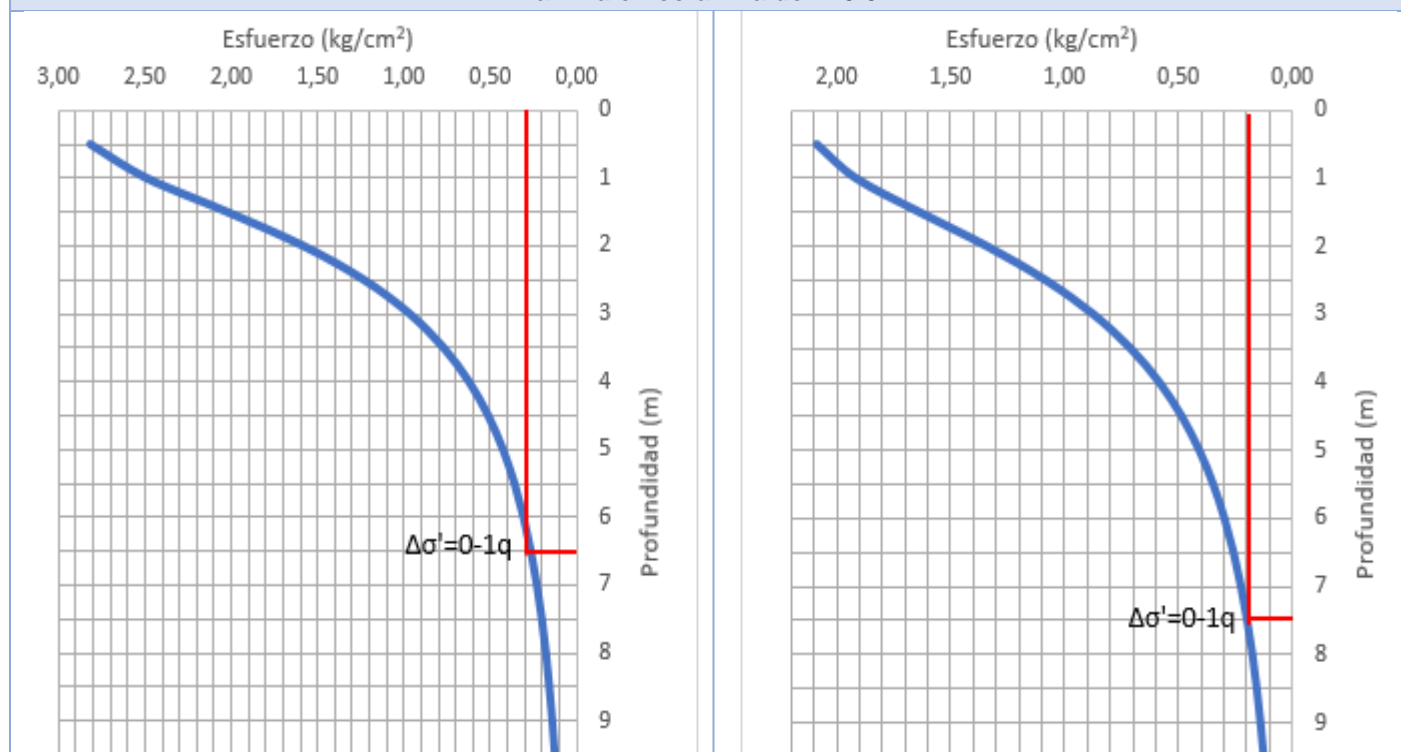
La tabla No. 5.19 muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo para edificaciones de categoría media (siete niveles).

**TABLA No. 5.19** Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones  $B=L=3.0$  m y  $B=L=3.5$  m para una carga máxima en columna de 260.0 T.

<b>CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN: MEDIA</b>			
B=L=3.0 m Carga en columna= 260.0 T q= 2.9 kg/cm <sup>2</sup>		B=L=3.5 m Carga en columna= 260.0 T q=2.1 kg/cm <sup>2</sup>	
PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.0 m
0.5	2.8189	4.5	0.5169
1.0	2.4922	5.0	0.4316
1.5	2.0248	5.5	0.3650
2.0	1.5857	6.0	0.3122
2.5	1.2351	<b>6.5</b>	<b>0.2698</b>
3.0	0.9710	7.0	0.2353
3.5	0.7746	7.5	0.2069
4.0	0.6279	8.0	0.1832

PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.5 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=3.5 m
0.5	2.0889	4.5	0.4891
1.0	1.9170	5.0	0.4121
1.5	1.6376	5.5	0.3510
2.0	1.3426	6.0	0.3019
2.5	1.0844	6.5	0.2621
3.0	0.8761	7.0	0.2294
3.5	0.7134	<b>7.5</b>	<b>0.2023</b>
4.0	0.5872	8.0	0.1796

**Gráfico de incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con  $B=L=3.0$  m y  $B=L=3.5$  m para una carga máxima en columna de 120.0 T.**



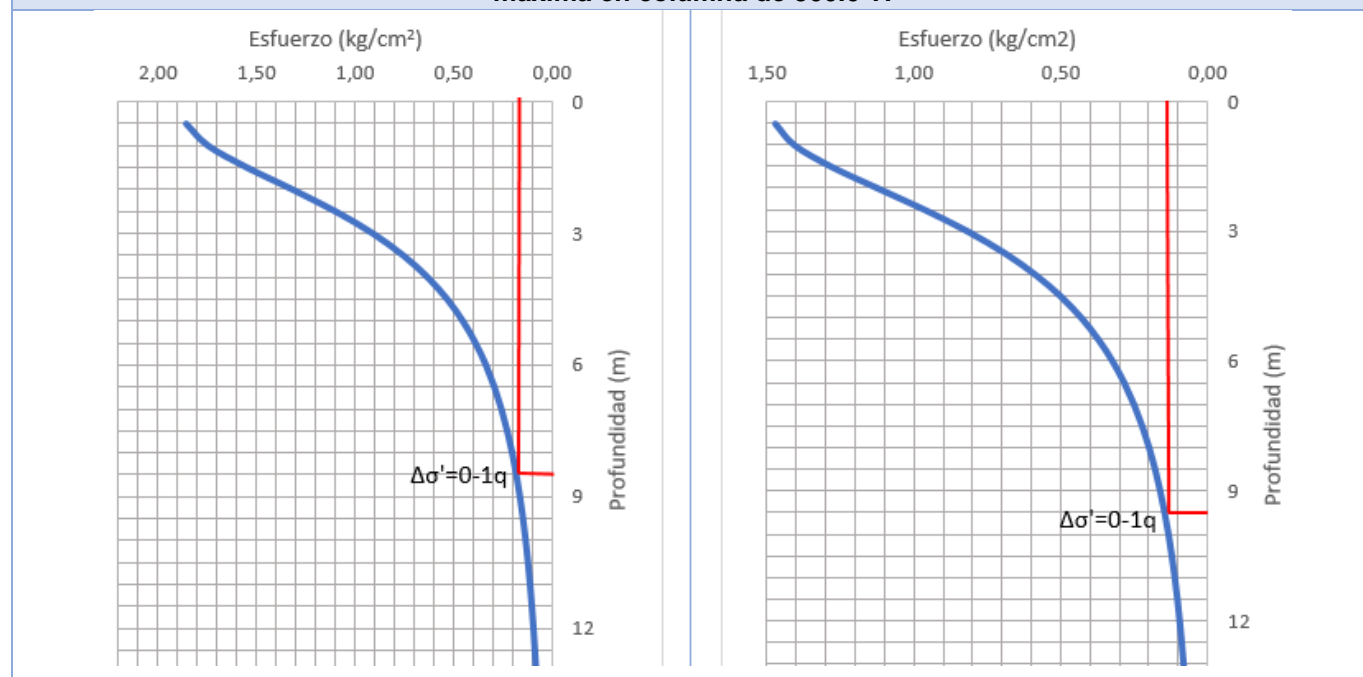
FUENTE: De los autores

En la tabla No. 5.20 se muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo para edificaciones de categoría alta (ocho niveles).

**TABLA No. 5.20** Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones  $B=L=4.0$  m y  $B=L=4.5$  m para una carga máxima en columna de 300.0 T

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN: ALTA							
B=L=4.0 m Carga en columna= 300.0 T q= 1.9 kg/cm <sup>2</sup>				B=L=4.5 m Carga en columna= 300.0 T q=1.5 kg/cm <sup>2</sup>			
PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.5 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.5 m
0.5	1.8547	5.5	0.3877	0.5	1.4700	5.5	0.3698
1.0	1.7435	6.0	0.3355	1.0	1.4043	6.0	0.3220
1.5	1.5448	6.5	0.2927	1.5	1.2780	6.5	0.2824
2.0	1.3142	7.0	0.2572	2.0	1.1198	7.0	0.2492
2.5	1.0955	7.5	0.2276	2.5	0.9591	7.5	0.2213
3.0	0.9078	8.0	0.2027	3.0	0.8132	8.0	0.1977
3.5	0.7539	8.5	0.1815	3.5	0.6880	8.5	0.1775
4.0	0.6302	9.0	0.1634	4.0	0.5837	9.0	0.1601
4.5	0.5312	9.5	0.1478	4.5	0.4979	9.5	0.1451
5.0	0.4518	10.0	0.1343	5.0	0.4276	10.0	0.1321

**Gráfico de incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con  $B=L=4.0$  m y  $B=L=4.5$  m para una carga máxima en columna de 300.0 T.**



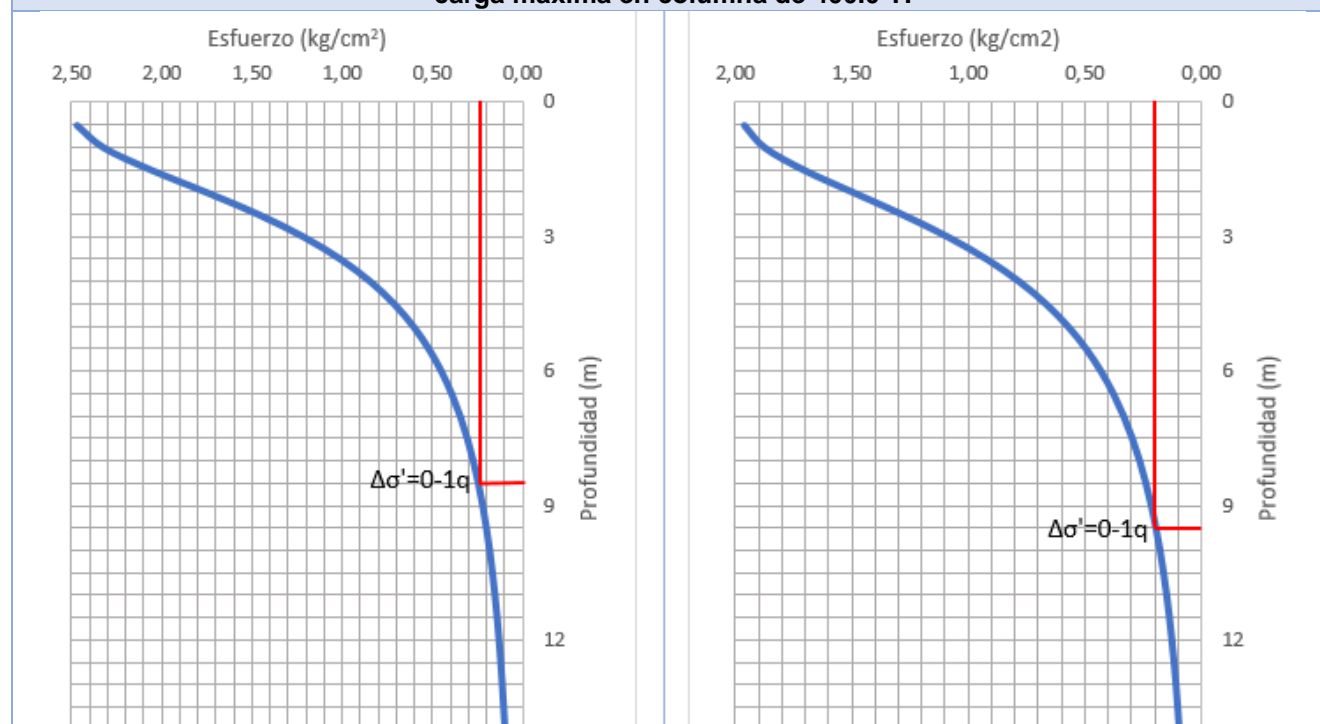
FUENTE: De los autores

En la tabla No. 5.21 se muestra el cálculo y el gráfico de la razón del incremento del esfuerzo para edificaciones de categoría alta (Diez niveles).

**TABLA No. 5.21** Cálculo del incremento de esfuerzos bajo una zapata aislada con dimensiones  $B=L=4.0$  m y  $B=L=4.5$  m para una carga máxima en columna de 400.0 T

CATEGORÍA DE EDIFICACIÓN: ALTA							
B=L=4.0 m Carga en columna= 400.0 T Esfuerzo= 2.5 kg/cm <sup>2</sup>				B=L=4.5 m Carga en columna= 400.0 T Esfuerzo=1.9 kg/cm <sup>2</sup>			
PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.0 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.5 m	PROF.(m)	$\Delta\sigma'$ (kg/cm <sup>2</sup> ) B=L=4.5 m
0.5	2.4729	5.5	0.5169	0.5	1.9600	5.5	0.4930
1.0	2.3247	6.0	0.4473	1.0	1.8724	6.0	0.4294
1.5	2.0598	6.5	0.3903	1.5	1.7040	6.5	0.3765
2.0	1.7522	7.0	0.3430	2.0	1.4930	7.0	0.3323
2.5	1.4607	7.5	0.3035	2.5	1.2788	7.5	0.2951
3.0	1.2104	8.0	0.2702	3.0	1.0842	8.0	0.2636
3.5	1.0052	8.5	0.2420	3.5	0.9173	8.5	0.2366
4.0	0.8403	9.0	0.2178	4.0	0.7783	9.0	0.2135
4.5	0.7083	9.5	0.1970	4.5	0.6639	9.5	0.1935
5.0	0.6024	10.0	0.1790	5.0	0.5701	10.0	0.1761

**Gráfico de incremento de esfuerzo bajo una zapata cuadrada con  $B=L=4.0$  m y  $B=L=4.5$  m para una carga máxima en columna de 400.0 T.**



FUENTE: De los autores

### Interpretación de resultados de la teoría de Boussinesq

A partir de los resultados de los gráficos generados en la sección anterior, en la tabla No.5.22 se muestra un resumen de estos, donde se presentan las profundidades en las que el esfuerzo representa el 10% del esfuerzo inicial para las categorías de edificación en estudio.

**Nota:** para la profundidad mínima a explorar se debe considerar la profundidad de desplante “ $D_f$ ”.

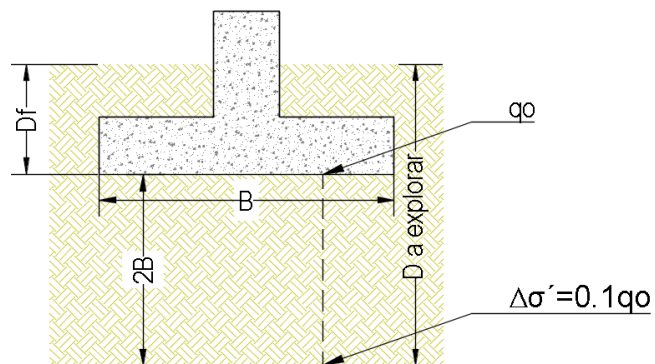
**TABLA No. 5.22** Resumen de resultados del análisis de la aplicación de la teoría de Boussinesq para transmisión de esfuerzos utilizando áreas cuadradas.

CATEGORIA	No. NIVELES	CIMENTACIÓN A UTILIZAR (m <sup>2</sup> )	PROFUNDIDAD A EXPLORAR (m)
Baja	3	2.0x2.0	4.0 + $D_f$
		2.5x2.5	5.5 + $D_f$
Media	4	3.0x3.0	6.5 + $D_f$
		3.5x3.5	7.5 + $D_f$
	7	3.0x3.0	6.5 + $D_f$
		3.5x3.5	7.5 + $D_f$
Alta	8	4.0x4.0	8.5 + $D_f$
		4.5x4.5	9.5 + $D_f$
	10	4.0x4.0	8.5 + $D_f$
		4.5x4.5	9.5 + $D_f$

FUENTE: De los autores

De la tabla anterior se concluye que, para los diferentes esfuerzos de contacto producidos entre la carga axial y áreas de cimentaciones propuestas, los incrementos de esfuerzo que representan el 10% del esfuerzo se generan aproximadamente a dos veces el ancho de la cimentación propuesta, como se ilustra en la figura No.5.18.



**Figura No. 5.18** Profundidad a explorar según teoría de Boussinesq

FUENTE: De los autores

**Profundidad de exploración (Teoría de Sowers y Sowers)**

Una regla simple para estructuras como hospitales y edificios de oficina, es relacionar la profundidad aproximada de los sondeos ( $P$ ), con el número de niveles ( $S$ ), esto es según Sowers y Sowers:

- ✓ Para estructuras ligeras:  $P = 3 * S^{0.7}$
- ✓ Para estructuras pesadas:  $P = 6 * S^{0.7}$

En la tabla No.5.23 se determinan las profundidades aproximadas de sondeo ( $P$ ) para las categorías de edificación definidas por la metodología HAZUS.

**TABLA No. 5.23** Profundidad de sondeos según Sowers y Sowers para categorías de edificación establecida por metodología HAZUS

CATEGORIA	No. NIVELES	PROFUNDIDAD A EXPLORAR (m)
<b>ESTRUCTURAS LIGERAS <math>P = 3 * S^{0.7}</math></b>		
Baja	3	6.0
Media	4	8.0
	7	12.0
Alta	8	13.0
	10	15.0
<b>ESTRUCTURAS PESADAS <math>P = 6 * S^{0.7}</math></b>		
Baja	3	13.0
Media	4	16.0
	7	23.0
Alta	8	26.0
	10	30.0

FUENTE: De los autores

### Interpretación de resultados producto de la aplicación de Teoría de Sowers y Sowers.

De acuerdo a la tabla No.5.23 las profundidades a explorar para una edificación de categoría baja es de seis metros, para una categoría de edificación media la profundidad de exploración de sondeos se encuentra entre 8.0 - 12.0 m, para una categoría de edificación alta la profundidad de sondeos es entre 13.0 m y 15.0 m, las profundidades antes mencionadas aplican para edificaciones de estructuras ligeras, cuando las edificaciones se proyectan con estructuras pesadas las profundidades aumentan aproximadamente el doble, respecto a las profundidades de exploración para estructuras ligeras.

### Comparación de resultados aplicación de las teorías de Boussinesq y Sowers y Sowers.

En la tabla No.5.24 se presenta el resultado de las teorías utilizadas para determinar la profundidad de exploración para edificaciones de tres a diez niveles.

**TABLA No. 5.24** Resultados de profundidades mínimas a explorar determinadas a partir de teorías de transmisión de esfuerzos de Boussinesq y Sowers y Sowers.

CATEGORIA	No. NIVELES	PROFUNDIDAD A EXPLORAR (m)		
		Boussinesq	Sowers y Sowers Estructuras ligeras	Sowers y Sowers Estructuras pesadas
Baja	3	$5.5 + D_f$	6.0	13.0
Media	4	$6.5 + D_f$	8.0	16.0
	7	$7.5 + D_f$	12.0	23.0
Alta	8	$8.5 + D_f$	13.0	26.0
	10	$9.5 + D_f$	15.0	30.0

FUENTE: De los autores

Al realizar un análisis de la tabla No.5.24, se puede observar que para edificaciones de tres y cuatro niveles Boussinesq y Sowers y Sowers (estructuras ligeras) recomiendan profundidades similares, sin embargo, para edificaciones mayores a siete niveles, se observa que Sowers sugiere profundidades a explorar mayores a las determinadas por Boussinesq, las cuales se consideran poco profundas para las categorías medias y altas, al consultar con los especialistas estos apoyan dicho planteamiento, por lo que para edificaciones de tres y cuatro niveles se tomarán las profundidades recomendadas por Boussinesq, y para las restantes las definidas por Sowers tanto para estructuras ligeras como pesadas.

A continuación, en la tabla No.5.25, se presenta un resumen de los requerimientos mínimos para profundidad de sondeos que se recomiendan para edificaciones de tres niveles a diez niveles, siendo el número de niveles un criterio para establecer la profundidad mínima de los sondeos.

**TABLA No. 5.25** Resumen de criterios para definir la profundidad mínima.

<b>ORTIZ-GESTA-MAZO (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, 4a. EDICIÓN.</b>		
<b>Variabilidad del terreno</b>	<b>NIVELES</b>	<b>PROFUNDIDAD MÍNIMA (m)</b>
<b>Terrenos de relieve suave sobre formaciones consolidadas o rocosas.</b>	<4	10.0
	4 - 10	12.0
<b>Llanuras y valles de ríos importantes. Zonas urbanas de nueva ocupación</b>	<4	12.0
	4 - 10	15.0
<b>Zonas tradicionalmente con cimentación profunda</b>	<4	15.0
	4 - 10	20.0
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>		
<b>Número de niveles</b>	3 - 8	8.0
	>8	15.0
<b>Teoría de Boussinesq (<math>\Delta\sigma' = 0.1q_o</math>)</b>	3	$D_f + 5.5$
	4	$D_f + 6.5$

<b>Sowers y Sowers (estructuras ligeras)</b>	4 - 7	8.0 - 12.0
	8 - 10	13.0 - 15.0
<b>Sowers y Sowers (estructuras pesadas)</b>	4 - 7	16.0 - 23.0
	8 - 10	26.0 - 30.0
<b>NORMATIVA ECUATORIANA</b>		
<b>Categoría de construcción</b>	3	6.0
	4 - 10	15.0
<b>NORMATIVA COLOMBIANA</b>		
<b>Variabilidad baja y media</b>	<4	15.0
	4 - 7	20.0
	8 - 10	25.0
<b>Variabilidad alta</b>	<4	20.0
	4 - 7	25.0
	8 - 10	25.0
<b>ESPECIALISTAS</b>		
<b>Especialista 1</b>	3 - 5	( $D_f + 6.0$ )
	6 - 10	$D_f + (10.0 - 12.0)$ .
<b>Especialista 2</b>	3	$D_f + 8.0$
	4	$D_f + (10 - 12.0)$
	5	$D_f + 15.0$
	6 - 7	20.0 m.
	7 - 10	Es necesario realizar estudios más especializados (Rotativas y geofísicos).

FUENTE: De los autores

### Propuesta de requerimientos mínimos:

A partir del análisis de la teoría de transmisión de esfuerzos y de los criterios establecidos por las literaturas y normativas geotécnicas internacionales, para elaborar una propuesta de requerimientos mínimos para la profundidad de exploración, la cual se presenta a continuación:

- Para edificaciones de tres niveles la profundidad mínima a explorar será de  $D_f + 5.0$  m.
- Para edificaciones de cuatro a seis niveles se recomienda una profundidad mínima de 12.0 m y para siete niveles como mínimo 15.0 m a partir del nivel

de desplante. Para edificaciones de ocho a diez niveles se recomienda una profundidad mínima de 20.0 m a partir del nivel de desplante, utilizando sondeos de tipo rotativo y complementar con geofísicos.

- En los casos que se tengan rellenos sobre el nivel actual del terreno natural en zonas bajas, donde se esperan encontrar en el subsuelo depósitos de suelos blandos, se deberá realizar sondeos más profundos.
- En el caso de sótanos, la profundidad de perforación deberá contarse a partir de la cota de fondo del mismo.

Consideraciones adicionales:

- En el caso de utilizar cimentaciones profundas:
  - Para pilotes individuales: La longitud total del pilote más largo que se utilice, más una profundidad adicional para garantizar la continuidad del estrato resistente, considerando como mínimo tres metros.
  - Para un grupo de pilotes: Longitud total del pilote más largo, más 2 veces el ancho del grupo de pilotes o 2.5 veces el ancho del cabezal de mayor dimensión.
- Cuando se encuentre un lecho rocoso, la profundidad mínima de perforación en roca será de 3.0 m, para garantizar que se trata de un estrato resistente.
- Para garantizar la continuidad del estrato resistente, se recomienda utilizar la tabla No.5.26.

**TABLA No. 5.26** Profundidad para verificar la continuidad estrato resistente.

NIVELES	PROFUNDIDAD MÍNIMA PARA VERIFICAR ESTRATO RESISTENTE (m)
	$dsf \geq 2 + 0.3p$ donde p: número de niveles (Sowers & Sowers)
3	3.0
4 - 7	3.0 - 4.0
8 - 10	4.0 - 5.0

FUENTE: De los autores

Para edificaciones que se encuentren en categoría alta, es importante realizar estudios especializados (rotativas, geofísica, etc.), para investigar los suelos que servirán de apoyo, debido a la inversión económica que se tendría en la ejecución de la superestructura, garantizando el adecuado funcionamiento de las cimentaciones y de la estructura en general.

#### 5.4.2 URBANIZACIONES

Al realizar un análisis de los criterios que establecen las diferentes literaturas geotécnicas, normativas y consultas realizadas a los especialistas en el área, en cuanto a los parámetros mencionados anteriormente se tiene lo siguiente:

##### ✓ **Espaciamiento de sondeos**

En relación al espaciamiento de los sondeos, al revisar normativas relacionadas a urbanización se observa que no definen espaciamientos entre sondeos, sin embargo, la “Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil”, Calderón et al, (1993), recomienda espaciamientos máximos que dependen de la

topografía del terreno, cuando se trate de una topografía uniforme los sondeos deben espaciarse entre 45.0 y 60.0 m como máximo, con la salvedad que se realizará una perforación en medio de la cuadrícula, mientras que para una topografía irregular, los espaciamientos máximos deben realizarse entre 25.0 y 30.0 m según el método de la cuadrícula establecido en las figuras Nos. 4.10 y 4.11 del apartado 4.2.

### **Propuesta de requerimientos mínimos**

Según lo establecido por la literatura geotécnica y el criterio del geotecnista, se elabora una propuesta para el espaciamiento máximo en urbanizaciones, la cual se presenta a continuación:

- El espaciamiento máximo de sondeo a realizar será de 45.0 a 60.0 m cuando la topografía sea regular siguiendo el método de la cuadrícula, con la salvedad que se realizará una perforación en medio de cada cuadrícula.
- Para topografías irregulares se deberán realizar los sondeos más cercanos, considerando un espaciamiento máximo de 25.0 a 30.0 m.
- Cuando se conozca la distribución de los lotes en los bloques de las urbanizaciones se podrá realizar un sondeo cada cuatro casas.

#### ✓ **Número mínimo de sondeos**

La tabla No.5.27 muestra un resumen de los requerimientos establecidos por todas las fuentes consultadas para el número mínimo de sondeos.

**TABLA No.5.27** Número mínimo de perforaciones en urbanizaciones de diferentes fuentes consultadas.

<b>INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (2014). NORMA CHILENA GEOTECNIA- ESTUDIO DE LA MECÁNICA DE SUELOS. NCH1508.</b>		
<b>RANGOS DE AREAS (m<sup>2</sup>)</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>PROFUNDIDAD</b>
Hasta 500.0 (<1.0 ha)	2	4.0 m
De 1001.0 a 2 000.0 (<1.0 ha)	4	
De 5001.0 a 10 000.0 (1.0 ha)	6	
De 20 001.0 a 30 000.0 (>1ha)	10	
Más de 30 000 (>1 ha)	Según lo indicado por el profesional competente, con un mínimo de 12.	
Hasta 1000.0 (<1.0 ha)	2	4.0 – 8.0 m
De 1001.0 a 4000.0 (<1.0 ha)	3	
De 4000.0 a 10 000.0 (1.0 ha)	4	
Más de 10 000.0 (>1.0 ha)	Según lo indicado por el personal competente, con un mínimo de 5.	
<b>NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98</b>		
<b>COMPLEJIDAD (AREA/# VIVIENDA+TERRENO)</b>	<b>NÚMERO</b>	
I (<1.0 ha)	3	
II (<1.0 ha)	4	
III (1.0 ha)	5	
IV (>1.0 ha)	6	
<b>ORTIZ-GESTA-MAZO (1989). CURSO APLICADO DE CIMENTACIONES, CUARTA EDICIÓN.</b>		
<b>ÁREA DE URBANIZACIÓN</b>	<b>NÚMERO</b>	
Topografía suave/homogénea	1.0 ha	3
	1 00.0 ha	9
	1 000.0 ha	12
Topografía media	1.0 ha	5
	1 00.0 ha	15
	1 000.0 ha	20
Topografía alta/ heterogénea	1.0 ha	6
	100.0 ha	22
	1 000.0 ha	30
<b>ESPECIALISTAS EN EL ÁREA</b>		
Cuando se conoce la distribución de lotes de la urbanización, realizar un sondeo cada cuatro casas.		

FUENTE: De los autores

Para definir el número mínimo de sondeos se realizó un ejercicio, el cual se muestra a detalle en el Anexo No.2, se consideró la unidad de análisis como un bloque, donde los resultados serán replicados según la cantidad de



bloques que conforme la urbanización, tomando como criterio dos fuentes: Calderón (método de la cuadrícula para topografías regulares) y los especialistas en el área (un sondeo cada cuatro casas).

Para el análisis se ha retomado del Reglamento A La Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del AMSS y de los Municipios aledaños, el área del lote permitida para una Urbanización Completa Tipo II (100.0 m<sup>2</sup>). Ver anexo No.1.

En la tabla No.5.28 se presentan los resultados obtenidos del ejercicio realizado:

**TABLA No.5.28** Número de sondeos por bloques de urbanizaciones.

Área de Lote Permitida	Calderón		Especialistas
	Topografía Regular	Topografía Irregular	
100m <sup>2</sup>	Área del bloque <1ha		
	8	12	11
	Área del bloque ≥1ha		
	10	12	16

FUENTE: De los autores

### Propuesta de requerimientos mínimos

Para una mejor planificación, los especialistas recomiendan realizar un estudio preliminar y uno definitivo. El preliminar se realizara cuando se tiene el terreno natural (sin trabajos de terracería), con poca densidad de sondeos, con el fin de conocer las condiciones generales del terreno, luego de los trabajos de terracería se realizara el estudio definitivo, en el que se requerirá una mayor densidad de sondeos.

### **Estudio preliminar**

Se realizará un estudio preliminar de toda la urbanización, necesario para conocer a las características geotécnicas aproximadas del terreno, con el fin de evaluar de manera general las condiciones prevalecientes del terreno. Se propone lo siguiente:

- El número de sondeos mínimo será:
  - Se realizarán cuatro sondeos para áreas de urbanizaciones menores a 1.0 ha.
  - Para áreas de urbanizaciones iguales a 1.0 ha se realizarán seis sondeos y en el caso de áreas mayores a 1.0 ha se realizarán como mínimo 12 sondeos.
- Los sondeos serán ubicados de tal manera de generar perfiles estratigráficos.
- Profundidad mínima de sondeos será de cinco metros a partir del nivel de terreno natural.
- Sera necesario realizar una visita al lugar para conocer los puntos favorables y desfavorables del terreno, ubicando la distribución de los sondeos dependiendo de la topografía y homogeneidad probable del terreno.
- La realización del estudio preliminar no puede reemplazar al estudio geotécnico definitivo.

### **Estudio definitivo**

Luego del estudio preliminar y de los trabajos de terracería, se realizará un estudio más detallado, considerando las características particulares del suelo y topografía del terreno.

Para el estudio definitivo se establecen los requerimientos mínimos de número, espaciamiento y profundidad de sondeos, para el análisis se considera como un bloque urbano, el que este conformado por cuatro vías vehiculares (pasaje vehicular con retorno, sendas vehiculares y pasajes peatonales no conforman un bloque solo pueden integrarse a él), los lotes que lo conforman tienen un área de 100.0 m<sup>2</sup> cada uno; luego de un análisis de la tabla No. 5.28 se propone lo siguiente para el número de sondeos por bloque:

- Para bloques de casas con un área menor a una hectárea se realizarán como mínimo ocho sondeos cuando la topografía del terreno sea regular, cuando esta sea irregular la cantidad mínima de sondeos a realizar será de once.
- En el caso de bloques de casas con áreas mayores o iguales a una hectárea, para topografías del terreno regulares se realizarán como mínimo diez sondeos, cuando la topografía sea irregular se realizarán como mínimo dieciséis.
- Si existen taludes cercanos, deberán ser explorados considerando su altura, pendiente y la distancia entre el talud y la urbanización para garantizar su estabilidad.

✓ **Profundidad de los reconocimientos**

La tabla No.5.29 muestra un resumen de los requerimientos establecidos por todas las fuentes consultadas para la profundidad de exploración mínima de sondeos.

**TABLA No.5.29** Profundidad mínima de perforación.

<b>NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-98 TITULO H-ESTUDIOS GEOTÉCNICOS (H.3 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO)</b>	
<b>COMPLEJIDAD (AREA/# VIVIENDA+TERRENO)</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>
I (<1.0 ha)	6.0
II (<1.0 ha)	8.0
III (1.0 ha)	10.0
IV (>1.0 ha)	15.0
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>	
<b>TOPOGRAFÍA</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>
Quebrada	4.0 a 6.0, medida a partir del nivel de desplante.
Uniforme	
<b>ESPECIALISTAS EN EL ÁREA</b>	
Profundidad mínima a explorar de 6.0 m	

FUENTE: De los autores

**Propuesta de requerimientos mínimos**

Luego de realizar un análisis de la tabla No.5.29 y considerando que generalmente las urbanizaciones constan de viviendas de dos niveles, se propone lo siguiente:

- Se deben de explorar los sondeos a una profundidad como mínimo de  $D_f + 5.0$  m, a partir del nivel de terracería.
- Cuando el terreno presente una variabilidad alta o suelos superficiales con baja resistencia se deberá explorar a una profundidad mínima de 8.0 m o hasta encontrar el estrato resistente.

### 5.4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA OBRAS DE PROTECCIÓN

#### Lineamientos mínimos para muros (gaviones):

A continuación, se realiza un análisis de los criterios que establecen las literaturas geotécnicas y normativas internacionales (ver tabla No.5.30), con el fin de elaborar una propuesta de los lineamientos mínimos a realizar en la exploración del suelo para los muros de retención.

**TABLA No.5.30** Resumen de lineamientos mínimos para la exploración del suelo.

<b>GUÍA ESPAÑOLA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERAS</b>			
<b>Longitud (L) / Altura (H) del muro</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
<b><math>L \leq 50.0 \text{ m} / H &gt; 10.0 \text{ m}</math></b>	3 perfiles de 3 sondeos c/u	No define espaciamiento máximo, sin embargo, establece que se debe explorar adelante, por debajo y detrás del muro.	Explorar una profundidad igual o superior a la altura del muro, a menos que a menor profundidad se compruebe la existencia de roca sana.
<b><math>L \leq 5.00 \text{ m} / H \leq 10.0 \text{ m}</math></b>	3 perfiles de 2 sondeos c/u		
<b><math>L &gt; 50.0 \text{ m} / H &gt; 10.0 \text{ m}</math></b>	3 perfiles + 1 perfil @20.0 m de longitud adicionales c/u de 3 sondeos		
<b><math>L &gt; 50.0 \text{ m} / H \leq 10.0 \text{ m}</math></b>	3 perfiles + 1 perfil @ 20.0 m de longitud adicionales de 2 sondeos c/u		
<b>ADMINISTRACIÓN FEDERAL DE CARRETERAS (FHWA)</b>			
<b>A lo largo del alineamiento de la estructura</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
	No define	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizarse a intervalos de cada 30.0 m a lo largo de la cimentación</li> <li>• Cada 45.0 m a lo largo de la parte posterior de la estructura de suelo reforzado.</li> </ul>	La profundidad a explorar deberá ser igual al doble de la altura de la pared (2H), sin embargo, si se detecta roca sana a poca profundidad los sondeos pueden tener una profundidad de 3.0 m
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>

<b>Sobre la línea de cimentación</b>	2 sondeos	15.0 m	• 1.5 a 2.0 veces el ancho del cimiento del muro a partir del nivel de desplante.
<b>NORMATIVA ESPAÑOLA DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL CIMIENTOS (SE-C, 2008)</b>			
<b>Longitud de la obra (L):</b>	<b>NÚMERO</b>	<b>ESPACIAMIENTO (m)</b>	<b>PROFUNDIDAD(m)</b>
<b>L &gt; 100.0 m</b>	-	No Mayor de 50.0 m entre sí.	No define
<b>Altura del muro (H):</b>	-	-	
<b>H &lt; 5.0 m</b>	1 sondeo / perfil	1 perfil @ 20.0 m de la longitud total del muro.	
<b>5.0 m &lt; H &lt; 10.0 m</b>	2 sondeos / perfil		
<b>H &gt; 10.0 m</b>	3 sondeos / perfil		
<b>General</b>	2 sondeos	50.0 m	

FUENTE: De los autores

Al realizar un análisis de los criterios establecidos por las diferentes literaturas y normativas presentadas en la tabla No.5.30, se establece la siguiente propuesta de los requerimientos mínimos para número y espaciamiento de sondeos para muros (gaviones):

### **Propuesta de requerimientos mínimos**

#### **✓ Número y espaciamiento de sondeos**

- Ubicar los sondeos adelante, sobre y detrás del muro por perfil proyectado.
- Se deben realizar perfiles transversales a la longitud del muro, según lo siguiente:
  - Para longitudes menores de 50.0 m se realizarán como mínimo tres perfiles. La cantidad de sondeos por perfil será de dos para muros

menores a diez metros de altura y de tres para muros mayores a diez metros.

- Muros con longitudes mayores de 50.0 m y alturas superiores a 10.0 m, se realizarán perfiles transversales de tres sondeos a cada 20.0 m cuando la variabilidad del terreno sea alta y a cada 45.0 m cuando la variabilidad sea baja.
- Muros con longitudes mayores de 50.0 m y alturas menores a 10.0 m, se realizarán perfiles transversales de dos sondeos a cada 20.0 m cuando la variabilidad del terreno sea alta y a cada 45.0 m cuando la variabilidad sea baja.
- El espaciamiento máximo entre sondeos será de 50.0 m para muros de gran longitud utilizados para carreteras.

✓ **Profundidad mínima de sondeos**

Para definir la profundidad a explorar fue necesario realizar un análisis de la transmisión de esfuerzos (bulbo de presiones) para la cimentación del muro, la cual se considera como una zapata corrida de longitud infinita. La teoría de Boussinesq establece que para una zapata rectangular de longitud infinita y con una carga uniformemente distribuida, estima que la profundidad del bulbo de presiones es  $P \approx 3B$ .

En la tabla No.5.31 se muestran los diferentes criterios para establecer la profundidad a explorar de los sondeos, siendo H la altura del muro y B el ancho del cimiento del muro.

**TABLA No.5.31** Resumen de lineamientos mínimos para profundidad de exploración del suelo.

FUENTES	GUÍA ESPAÑOLA DE CIMENTACIONES EN OBRAS DE CARRETERAS	FHWA	CALDERÓN, ET AL.1993	NORMATIVA ESPAÑOLA (SE-C, 2008)
Profundidad explorar (P)	$P \geq H$	$P = 2H$	$P = 1.5 \text{ a } 2.0 * B$	No define
Profundidad bulbo de presiones	$P \approx 3B$			

FUENTE: De los autores

Calderón, et al. (1993), establece que, para el predimensionamiento de los muros, se estima un ancho del cimiento de 0.665 veces la altura del muro ( $B = 0.665H$ ), al sustituir dicho valor en la ecuación  $P = 1.5B$  y  $P = 2B$ , se tiene  $P = 1.5(0.665H)$  y  $P = 2(0.665H)$ , resultando  $P = H$  y  $P = 1.33H$  respectivamente.

Al sustituir  $B = 0.665H$  en la ecuación de la profundidad de bulbo de presiones, se obtiene que  $P \approx 3(0.665H) \approx 2H$ , la cual coincide con la profundidad recomendada por la FHWA. Como resultado de este análisis se tienen cuatro criterios para establecer la profundidad, siendo estos:

- $P = 3B$
- $P = 1.3H$
- $P = 2H$
- $P = H$



Con base al planteamiento anterior se establece que, se debe de explorar en la base del muro a partir del nivel de desplante, una profundidad mínima de  $1.3H$  o  $3B$ , (predominara la mayor profundidad) o hasta encontrar un estrato resistente, se extraerá muestras (núcleo), en una profundidad de al menos  $3.0$  m, para inspeccionar la naturaleza de la roca y sus discontinuidades.

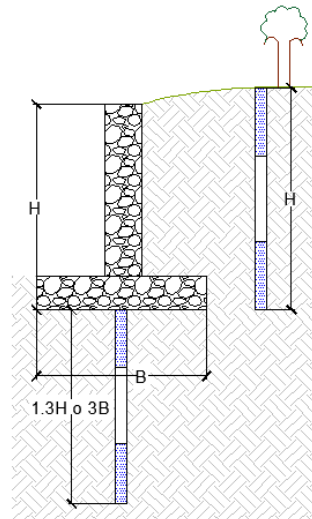
Según los especialistas en el área se recomienda que, para los sondeos ubicados atrás del muro, la profundidad a explorar sea igual a la altura del mismo ( $P=H$ ).

#### **Propuesta de requerimientos mínimos**

Luego del análisis realizado, se elaboró la siguiente propuesta de requerimientos mínimos para la profundidad de sondeos en muros (gaviones):

- Se debe explorar en la base del muro tres veces el ancho de la cimentación o  $1.3$  veces la altura del muro (la que resulte mayor), o en su defecto hasta encontrar un estrato resistente (Ver figura No.5.19)
- Se realizarán perforaciones atrás del muro, a una profundidad igual a la altura de este, para determinar las propiedades mecánicas del suelo que estará en contacto con el muro. (Ver figura No.5.19)

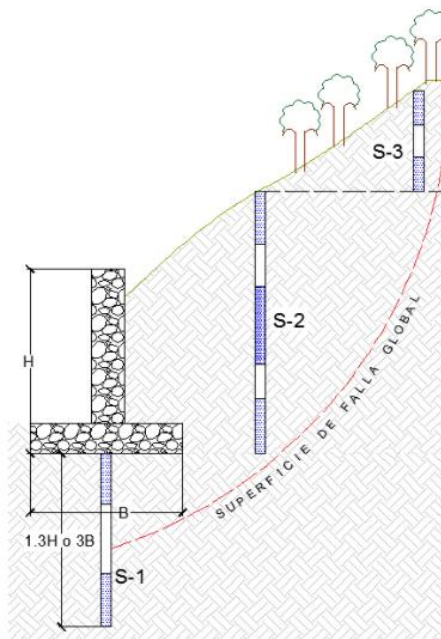
**Figura No.5.19.** Profundidad mínima a explorar.



FUENTE: De los autores

- Cuando se tengan obras civiles que puedan ocasionar sobrecargas al muro, se deberá evaluar la incidencia que tiene en él, trazando la proyección del plano con una orientación, de  $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ , a partir del extremo interno de la base de apoyo del muro, si la sobrecarga se encuentra dentro de la cuña formada por dicho ángulo, la profundidad a explorar deberá incrementarse hasta un nivel en que se garantice la estabilidad del muro.
- Para muros que retienen taludes pronunciados, se deberá realizar una perforación en la corona de este, la cual permita obtener suficiente información para evaluar su estabilidad global. (Ver figura No.5.20)

**Figura No.5.20.** Perforación adicional para evaluar la falla global.



FUENTE: De los autores

### Lineamientos mínimos para taludes revestidos con Soil nailing:

A continuación, en la tabla No. 5.32 se presentan los criterios establecidos por las literaturas geotécnicas, normativas y códigos internacionales, con el fin de elaborar una propuesta de los lineamientos mínimos a realizar en la exploración del suelo para taludes (soil nailing).

**TABLA No.5.32** Resumen de requerimientos mínimos para taludes.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, GEOTECHNICAL ENGINEERING, DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, AÑO 2003			
LONGITUD DE SOIL NAILING	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
$\geq 30.0$ m	No define	30.0 – 60.0 a lo largo de la línea central del muro	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las perforaciones traseras del soil nailing y a lo largo de este se deberán profundizar al menos dos veces la altura de pared completa del nailing a</li> </ul>
$< 30.0$ m		Al menos una perforación a lo largo de la línea central del muro	
Enfrente de la pared del muro		Las perforaciones enfrente de la pared deben ubicarse dentro de una distancia de hasta 0.75 H y	

		debe estar espaciado hasta 60.0 m a lo largo de la pared del muro.	partir de la corona del talud
Detrás de la pared del muro		Deberán estar ubicadas a una distancia de 1.0-1.5H y deberán ser espaciados de 30.0 a 45.0 m a lo largo de la pared. Si el suelo detrás de la pared propuesta es pendiente, las perforaciones detrás del muro propuesto deben ubicarse más atrás del muro, hacia arriba aproximadamente de 1.5-2H de la pared 30.0 a 45.0 m a lo largo de la pared del muro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las perforaciones frontales de la pared deberán profundizarse la altura del muro.</li> </ul>
<b>CÓDIGO DE LADERAS DISTRITO BARRANQUILLA, COLOMBIA (2007)</b>			
	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Por lo menos el 50% de los sondeos.	No define	No define	1.25 veces la diferencia de altura entre el pie y la corona del talud analizado o penetrar por lo menos cuatro metros en material firme.
<b>NORMA TÉCNICA COLOMBIANA PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y PARA LA REALIZACIÓN DE ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS. (2005).</b>			
<b>GENERAL</b>	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
50% de los sondeos	-	-	1.5 la altura del talud
PENDIENTE DEL TALUD			-
≤45° y H>20.0 m	No define	No define	15.0
>45° y H>20.0 m			20.0
<b>GUÍA PARA PRUEBAS DE SUELOS QUE SE REALIZAN EN CAMPO Y LABORATORIO APLICADAS EN OBRAS DE INGENIERÍA CIVIL” (CALDERÓN, ET AL.1993)</b>			
<b>GENERAL</b>	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
Según longitud del talud	3	Sondeos serán a cada 15.0 a 25.0, a lo largo de la corona, cuerpo y pie del talud.	No define
<b>CÓDIGO GEOTÉCNICO DE TALUDES Y LADERAS DE COSTA RICA (2015). COLEGIO FEDERADO DE INGENIEROS Y ARQUITECTOS</b>			
Por lo menos el 50% de los sondeos.	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
	3	No define	1.5 veces la altura del talud

ESPECIALISTAS			
	NÚMERO	ESPACIAMIENTO (m)	PROFUNDIDAD (m)
General		El espaciamiento de los sondeos es de 15.0 a 20.0 metros linealmente a lo largo del talud. Se deben colocar sondeos en la corona y al pie de talud, lo ideal es realizar un sondeo intermedio para ver la distribución de estratos en medio del talud.	Se recomienda realizar exploraciones en la corona del talud las cuales atraviesen todo el cuerpo del talud para conocer las propiedades del suelo donde se anclará el nailing.

FUENTE: De los autores.

Al realizar un análisis de los criterios establecidos por las diferentes literaturas, normativas y códigos descritos en la tabla No.5.32, se establece la siguiente propuesta de los requerimientos mínimos para número y espaciamiento de sondeos para taludes (soil nailing):

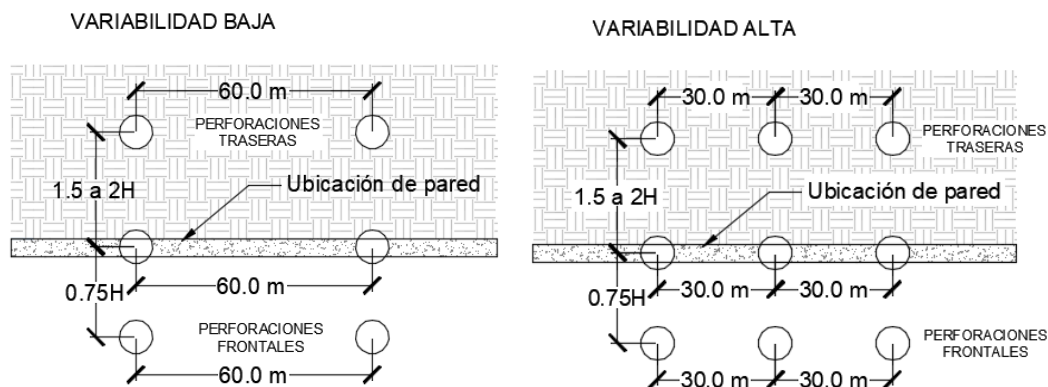
✓ **Número y espaciamiento de sondeos**

**Propuesta de requerimientos mínimos**

- Realizar una visita de campo con el especialista en el área, para definir la ubicación de los sondeos y las características de las zonas más críticas del talud.
- Se realizará como mínimo tres sondeos, estos estarán ubicados en el pie, cuerpo y corona del talud.
- Los sondeos a lo largo del talud serán espaciados de acuerdo a las siguientes condiciones:

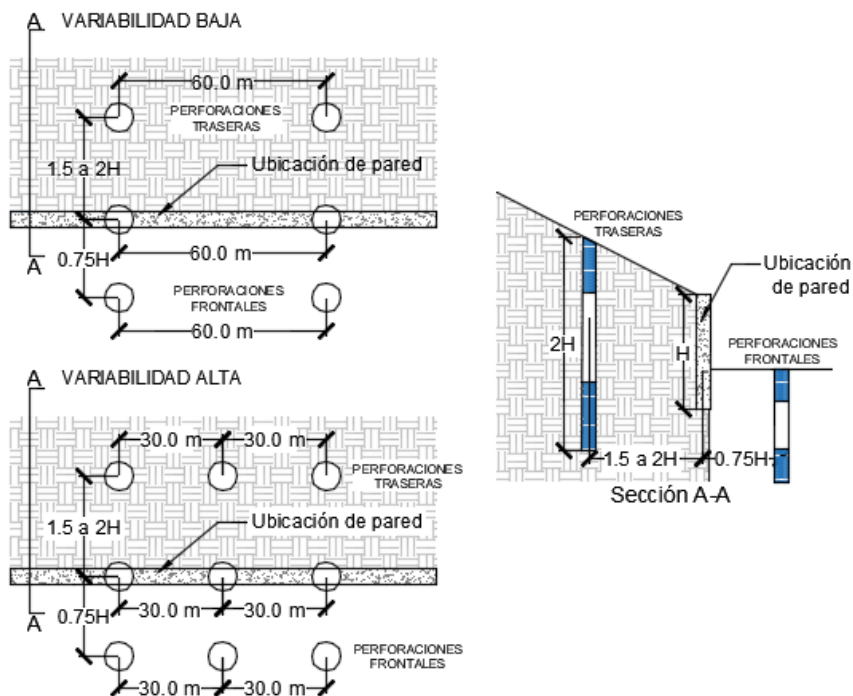
- Las perforaciones traseras se deberán ubicar a una distancia de al menos  $1.0-1.5H$  a partir de la pared del nailing. ( Ver figura No. 5.21)
- Enfrente de la pared del muro los sondeos se ubicarán a una distancia de  $0.75 H$  a partir de la pared del nailing, tal como se muestra en la figura No.5.21
- Cuando el suelo detrás de la pared presente una topografía inclinada, las perforaciones traseras se deberán ubicar a una distancia de  $1.5-2H$  a partir de la pared del nailing. (Ver figura No. 5.22)
- La separación máxima de las perforaciones traseras, frontales y sobre la pared del nailing, deberán de ser de  $30.0\text{ m}$  cuando la variabilidad del suelo sea alta y de  $60.0\text{ m}$  cuando la variabilidad sea baja, de tal manera que se puedan generar los perfiles estratigráficos, tal como se muestra en las figuras Nos. 5.21 y 5.22.

**Figura No.5.21** Lineamientos preliminares para la planificación del número y la ubicación de las perforaciones para los muros soil nailing.



FUENTE: De los autores

**Figura No. 5.22** Ubicación de las perforaciones para los muros soil nailing.



FUENTE: De los autores.

✓ **Profundidad mínima de sondeos**

La tabla resumen No.5.33 muestra los diferentes criterios para establecer la profundidad a explorar de los sondeos (P), respecto a la altura del talud (H).

**TABLA No.5.33** Resumen de lineamientos mínimos para profundidad de exploración del talud.

TEORÍAS	FHWA	CÓDIGO DE LADERAS BARRANQUILLA	NORMA TÉCNICA COLOMBIANA PARA EL CONTROL DE EROSIÓN	CALDERÓN, ET AL.1993	CÓDIGO GEOTÉCNICO DE TALUDES Y LADERAS DE COSTA RICA
P	Las perforaciones ubicadas en el relleno del muro, $P = 2H$ a partir de la corona del talud y las frontales $P = H$ .	$1.25 H$ o penetrar por lo menos cuatro metros en material firme.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si la pendiente inferior del talud es <math>\leq 45^\circ \therefore P = 15.0 \text{ m}</math></li> <li>• Si la pendiente inferior del talud es <math>&gt; 45^\circ \therefore P = 20.0 \text{ m}</math></li> </ul> Para ambos casos $H > 20.0 \text{ m}$	No define	$1.5H$

FUENTE: De los autores

### **Propuesta de requerimientos mínimos**

Luego de realizar un análisis de la tabla No.5.33, se establece la siguiente propuesta de los requerimientos mínimos para profundidad de sondeos en taludes (soil nailing):

- Los sondeos en la corona del talud se profundizarán dos veces su altura ( $P = 2H$ ), en cambio en el pie y el cuerpo la profundidad será igual a la altura del talud ( $P = H$ ).
- Para estas condiciones se llegará a esa profundidad siempre y cuando el suelo o roca tengan características geotécnicas que garanticen su estabilidad, de lo contrario se deberá continuar profundizando hasta encontrar suelo estable o roca.
- Las perforaciones deberían ser más profundas cuando los suelos son muy compresibles (suelos de grano fino, limo orgánico y turba), ubicados detrás o debajo de la pared propuesta de soil nailing, así como también en presencia de suelos sueltos, saturados y sin cohesión. En caso que se encuentra roca dentro de la profundidad seleccionada, se extraerá muestras (núcleos) en una zona comprendida de al menos 3.0 m de profundidad, para inspeccionar la naturaleza de la roca y sus discontinuidades.



## **6.0 CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

El presente capítulo divide las conclusiones y recomendaciones en dos etapas:

La primera que comprende la evaluación de los estudios geotécnicos que sirvieron de base para la creación de los mapas objeto de estudio, seguido de la elaboración de los mapas de características geotécnicas (comprende los mapas de humedades, compacidades y clasificación de suelos a las profundidades de dos y cinco metros).

La segunda etapa presenta la propuesta de requerimientos mínimos para número, espaciamiento y profundidad de exploración de los sondeos para los estudios de suelos en edificaciones de tres a diez niveles, urbanizaciones y obras de protección (muros gavión y taludes revestidos con Soil nailing).

## 6.2 CONCLUSIONES

### 6.2.1 ESTUDIOS DE SUELOS

- De la revisión de los estudios de suelos en el área de estudio, comprendidos en un periodo del 2001-2010, se concluye que estos no presentan lo siguiente: clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), correlaciones utilizadas para determinar las propiedades mecánicas del suelo (ángulo de fricción interna y la cohesión del suelo), memoria de cálculo de la capacidad de carga del suelo, ni la determinación del  $N_{\text{corregido}}$ .

### 6.2.2 MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Los mapas de características geotécnicas para la zona en estudio, son de carácter informativo, estos no sustituyen la ejecución de un estudio de suelos. Con base al análisis realizado de los mapas de características geotécnicas, se concluye lo siguiente:

#### **Mapa de humedad**

- No existe variaciones importantes en el comportamiento de las humedades para las profundidades de dos y cinco metros en ambas estaciones, siendo el rango de humedades predominantes del 10 al 30%.

#### **Mapa de compacidad de suelos**

- Para las profundidades de análisis, predominan zonas con compacidades medianas, correspondientes a  $N_{\text{campo}}$  de 11 a 30 golpes.

### **Mapa de clasificación de suelos**

- Los suelos predominantes en el área de estudio para ambas profundidades son los limos arenosos (ML) y arenas limosas (SM) confirmando así la geología de la zona.

### **6.2.3 PROPUESTA DE REQUEMIMIENTOS MÍNIMOS PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN Y EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES.**

La propuesta establece lineamientos mínimos de número, espaciamiento y profundidad de exploración de los sondeos, sin embargo, esta puede modificarse de acuerdo a las condiciones propias del lugar, del proyecto y del criterio del geotecnista.

Con base a la bibliografía especializada y a las consultas a los especialistas del área, se concluye lo siguiente:

#### **Edificaciones de tres y más niveles.**

- Para edificaciones de tres niveles: Se realizarán como mínimo 4 sondeos; el espaciamiento máximo será de 25.0 a 30.0 m y la profundidad mínima a explorar será de  $D_f + 5.0$  m.
- Para edificaciones de cuatro a siete niveles: se realizarán como mínimo cinco sondeos; el espaciamiento máximo será de 20.0 a 25.0 m y la profundidad mínima a explorar para cuatro y seis niveles será 12.0 m y para siete niveles como mínimo 15.0 m a partir del nivel de desplante.

- Para edificaciones de ocho a diez niveles: se realizarán como mínimo cinco sondeos; el espaciamiento máximo será de 15.0 – 20.0 m y la profundidad mínima a explorar será de 20.0 m a partir del nivel de desplante, utilizando sondeos de tipo SPT, rotativas y estudios complementarios de tipo geofísicos.
- Para edificaciones altas (ocho a diez niveles) donde se proyecte utilizar cimentaciones profundas, la profundidad mínima a explorar será la siguiente:
  - Para un pilote individual: la longitud total del pilote más largo que se utilice, más una profundidad adicional, para garantizar la continuidad del estrato resistente, considerando como mínimo tres metros.
  - Para un grupo de pilotes: longitud total del pilote más largo, más 2 veces el ancho del grupo de pilotes o 2.5 veces el ancho del cabezal de mayor dimensión. Cuando se encuentre el estrato resistente se debe penetrar al menos 3.0 m en él.

### **Urbanizaciones**

- Se realizarán dos estudios de suelos; el primero será una exploración preliminar con poca densidad de sondeos para conocer las condiciones generales del terreno, y luego de los trabajos de terracería se realizará el segundo estudio de suelos que corresponde a la exploración definitiva, en el que se requerirá una mayor densidad de sondeos.

#### **Estudio preliminar**

- Se realizarán cuatro sondeos para áreas de urbanizaciones menores a 1.0 ha.

- Para áreas de urbanizaciones iguales a 1.0 ha se realizarán seis sondeos y en el caso de áreas mayores a 1.0 ha se realizarán como mínimo 12 sondeos.
- Profundidad mínima de sondeos será de cinco metros a partir del nivel de terreno natural.

### **Estudio definitivo**

- Para bloques de casas con un área menor a una hectárea se realizarán como mínimo ocho sondeos cuando la topografía del terreno sea regular, cuando esta sea irregular la cantidad mínima de sondeos a realizar será de once.
- En el caso de bloques de casas con áreas mayores o iguales a una hectárea, para topografías del terreno regulares se realizarán como mínimo diez sondeos, cuando la topografía sea irregular se realizarán como mínimo dieciséis.
- La profundidad mínima a explorar será de  $D_f + 5.0$  m a partir del nivel de terracería.

### **Obras de protección**

- **Muros (gaviones)**

- Ubicar los sondeos adelante, sobre y detrás del muro por perfil proyectado.
- Muros con longitudes mayores de 50.0 m se realizarán perfiles transversales cada 20.0 m cuando la variabilidad del terreno sea alta y

cada 45.0 m cuando la variabilidad sea baja, para muros menores de 50.0 m se distribuirán como mínimo tres perfiles.

- La cantidad mínima de sondeos por perfil será de dos para muros menores a diez metros de altura y de tres para muros mayores.
- En cuanto a la profundidad mínima de exploración, en la base del muro se debe profundizar tres veces el ancho de la cimentación o 1.3 veces la altura del muro (la que resulte mayor), o en su defecto hasta encontrar un estrato resistente, las perforaciones ubicadas atrás del muro alcanzarán una profundidad mínima igual a la altura de este.
- Para muros de gran longitud utilizados para carreteras el espaciamiento máximo entre sondeos será de 50.0 m.

- **Taludes revestidos con Soil nailing**

- Realizar una visita de campo con el especialista en el área, para definir la ubicación de los sondeos y las características de las zonas más críticas del talud.
- Se realizará como mínimo tres sondeos, ubicados en el pie, cuerpo y corona del talud.
- Se realizarán perforaciones traseras a la pared del nailing, ubicadas paralelamente a una distancia de la corona de 1.0-1.5H.
- Se realizarán perforaciones frontales, ubicadas a una distancia paralela a la pared del nailing de 0.75 H.

- Cuando el suelo detrás de la corona presente una topografía inclinada, las perforaciones traseras se deberán ubicar a una distancia paralela a la corona del talud de 1.5-2H.
- La separación máxima de las perforaciones traseras, frontales y sobre a la pared del nailing, deberán de ser de 30.0 m cuando la variabilidad del suelo sea alta y de 60.0 m cuando la variabilidad sea baja, de tal manera que se puedan generar los perfiles estratigráficos.
- En cuanto a la profundidad mínima, los sondeos en la corona del talud se profundizarán a partir del terreno natural, como mínimo dos veces su altura ( $P = 2H$ ), en cambio en el pie y el cuerpo la profundidad será igual a la altura del talud ( $P = H$ ), siempre y cuando el suelo o roca tengan características geotécnicas que garanticen su estabilidad.

## **6.3 RECOMENDACIONES**

### **6.3.1 ESTUDIOS DE SUELOS**

- Los estudios geotécnicos deben incluir ensayos de análisis granulométrico y límites de Atterberg (para suelos que presenten plasticidad), para realizar una clasificación de suelos según SUCS (ASTM D2487).
- Incluir en los estudios de suelos memoria de cálculo de  $N_{\text{corregido}}$ , capacidad de carga del suelo, peso volumétrico, así como también de las correlaciones utilizadas para determinar el ángulo de fricción y la cohesión.

- Realizar ensayos triaxiales o corte directo, que permita determinar las propiedades mecánicas de los suelos en taludes.

### 6.3.2 MAPAS DE CARACTERISTICAS GEOTÉCNICAS

- El mapa de características geotécnicas se realizó con informes geotécnicos que corresponden a un periodo de estudios comprendido entre los años 2001-2010, por lo que se recomienda actualizarlo con información a la fecha.
- El mapa es de carácter informativo, este no sustituye la ejecución de un estudio de suelos, que determine las condiciones prevalecientes del suelo.
- Incluir en el mapa otras propiedades del suelo, siendo necesario agregar a los estudios de suelos propiedades geotécnicas como ángulo de fricción y cohesión, obtenidas directamente de ensayos geotécnicos y no por correlaciones con SPT.

### 6.3.3 PROPUESTA DE REQUEMIMIENTOS MÍNIMOS PARA URBANIZACIONES, OBRAS DE PROTECCIÓN Y EDIFICACIONES DE TRES Y MAS NIVELES.

#### **Edificaciones de tres y más niveles.**

- El 70% de los sondeos estarán ubicados dentro de la huella del edificio, en zonas con mayor concentración de cargas y/o variabilidad del terreno alta, se deberá aumentar el número mínimo de sondeos establecidos en la propuesta. Cuando se encuentren taludes cercanos a las edificaciones, estos deberán ser considerados en la evaluación del comportamiento geotécnico de la estructura.



- Se deberán realizar sondeos más profundos del mínimo establecido, cuando se tengan rellenos sobre el nivel actual del terreno natural, donde se esperan encontrar en el subsuelo depósitos de suelos blandos; en caso se encuentre un estrato resistente, la profundidad mínima de perforación será de tres metros, para garantizar su continuidad.
- En el caso de sótanos, la profundidad de perforación deberá contarse a partir de la cota de fondo del mismo.
- En edificaciones que presenten caja de elevador, se recomienda realizar un sondeo en la ubicación del mismo.

### **Urbanizaciones**

- **Estudio preliminar**
  - Los sondeos serán ubicados de tal manera de generar perfiles estratigráficos.
  - Realizar una visita al lugar para conocer los puntos favorables y desfavorables del terreno, ubicando la distribución de los sondeos dependiendo de la topografía y homogeneidad probable del terreno.
  - La realización del estudio preliminar no puede reemplazar al estudio geotécnico definitivo.

- **Estudio definitivo**

- El número, espaciamiento y profundidad de exploración aumentara dependiendo de la variabilidad del terreno y del criterio de geotecnista.
- Cuando se tenga suelos superficiales con baja capacidad de carga, la profundidad mínima a explorar será de 8.0 m o hasta encontrar un estrato resistente.
- Si existen taludes cercanos, deberán ser explorados considerando su altura, pendiente y la distancia entre el talud y la urbanización para garantizar su estabilidad.

### **Obras de protección**

- **Muros (gaviones)**

- Cuando en la exploración de la base del muro se encuentre un lecho rocoso, la profundidad mínima de perforación en la roca será de tres metros, para garantizar su continuidad.
- Para muros que retienen taludes pronunciados, se deberá realizar una perforación adicional, en la corona de este, la cual permita obtener suficiente información sobre los suelos presentes, para evaluar su estabilidad global.
- Cuando se tengan obras civiles que puedan ocasionar sobrecargas al muro, se deberá evaluar la incidencia que tiene en él, trazando la proyección del plano con una orientación, de  $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ , a partir del

extremo interno de la base de apoyo del muro, si la sobrecarga se encuentra dentro de la cuña formada por dicho ángulo, la profundidad a explorar deberá incrementarse hasta un nivel en que se garantice la estabilidad del muro.

- **Taludes revestidos con Soil nailing**

- Si al alcanzar la profundidad mínima de  $2H$  en la corona y de  $H$  en el cuerpo y pie del talud, se encuentren suelos muy compresibles (suelos de grano fino, limo orgánico y turba), así como también en presencia de suelos sueltos, saturados y sin cohesión, la profundidad se deberá incrementar hasta encontrar un estrato resistente que garantice su estabilidad.
- Si se encuentra roca dentro de la profundidad seleccionada, se extraerá un núcleo en una zona comprendida de al menos 3.0 m de profundidad, para inspeccionar la naturaleza de la roca y sus discontinuidades.

## BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Cartográfica Internacional (ACI).
- Asociación Costarricense de Geotecnia, (1994). Código de cimentaciones de Costa Rica.
- Asociación Costarricense de Geotecnia, (2001). Código de cimentaciones de Costa Rica.
- Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA) & Ministerio de Obras Públicas, (1977). Normativa Técnica para Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes.
- Ayala O., (2013). “Aplicación de los modelos constitutivos para representar el comportamiento de tierra blanca joven (TBJ), unidad G” Trabajo de graduación presentado para optar al grado de Ingeniero Civil en la Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- Braja Das, (2010). Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones, Séptima Edición.
- Calderón, N., Chávez, O., López, R. y Perdomo, H. (1993). “Guía para pruebas de suelo que se realizan en campo y en el laboratorio aplicadas en obras de Ingeniería Civil”, Universidad de El Salvador.
- Chávez, J., Hernández, W., & Kopecky, L., (2012). Problemática y conocimiento actual de las tefras Tierra Blanca Joven en el Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. Rev. Geol. Amér. Central.

- Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica, (2015). Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.
- Dirección General de urbanismo y arquitectura del MOP. Reglamento de las Construcciones.
- D. Ferrés, H. Delgado Granados, W. Hernández, C. Pullinger , H. Chávez, C. R. Castillo Taracena & C. Cañas Dinarte,(2011). “Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on el cambio archeological 249 site: a review based on tephrostratigraphy”. Editorial J. McPhie.
- Documento Básico SE-C Cimientos, (2007). Norma española, Seguridad Estructural de Cimientos.
- DYWIDAG Soil Nails, Dallas, TX.
- Federal Highway Administration, (2003). Geotechnical Engineering, Department of Transportation.
- Federal Highway Administration (FHWA), Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Volume I.
- Ferrés, Dolores. (2014). “Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de san salvador”. Universidad Nacional Autónoma de México. México

- Figueroa, G., Rodríguez, F., Zelada, E., (2011). Análisis y Diseño de Estructuras de Retención de Aplicación Reciente en El Salvador.
- Geotecnia y Cimentaciones Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), (2014). Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC).
- Gonzales de Vallejo, (2002). Ingeniería Geológica. Primera Edición. Madrid. Prentice Hall Pearson Educación.
- González de Vallejo, (1977). Aplicaciones de los mapas geomorfológicos a la planificación urbana con un ejemplo de Tenerife. Boletín Geológico y Minero, Madrid.
- Guía de cimentaciones en Obras de Carreteras, (2009). Secretaria de Planificación E Infraestructura.
- HAZUS 99, (2002). Earthquake Loss Estimation Methodology, technical manual. Federal Emergency Managemen Agency (FEMA).
- Hernández, E. W., (2008). "Congreso Geológico de América Central, San José, Costa Rica.
- Hernández, E., (2004). Características geomecánica y vulcanológicas de las tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango. El Salvador. Tesis de Maestría en Tecnologías Geológicas. Universidad Politécnica de Madrid.
- Instituto Nacional de Normalización, (2014). Norma Chilena Geotecnia-Estudio de la Mecánica de Suelos. NCh1508.

- Landaverde, M. (2007). "Recopilación de propiedades mecánicas de los suelos", Departamento de Geotecnia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador.
- Lexa, J., Sebesta, J., Chávez, J., Hernández, W., Pécskay, Z., (2011). Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. -J. Geol. Soc. Amer., Spec. Paper.
- Manual Técnico de Obras de Contención, Maccaferri.
- Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR-98. Título H-Estudios Geotécnicos, H.3 Investigación del Subsuelo.
- Normas estructurales de Diseño recomendadas para la República de Guatemala. AGIES NR-1, (2000), Capítulo 1 (1.3 Clasificación de obra).
- Norma Tecnológica Cimentaciones: Estudios Geotécnicos (NTE-CEG), (1975). Ministerio de la Vivienda, España.
- Norma Técnica Colombiana para el Control de Erosión y para la Realización de Estudios Geológicos, Geotécnicos e hidrológicos, (2005). Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
- Ortiz, J., Gesta, J., Mazo, C., (1989). Curso Aplicado de Cimentaciones, Cuarta Edición, Madrid, España,
- Ralph B. Peck, Walter E. Hanson, Thomas H Thornburn, Ingeniería De Cimentaciones, Primera Edición.

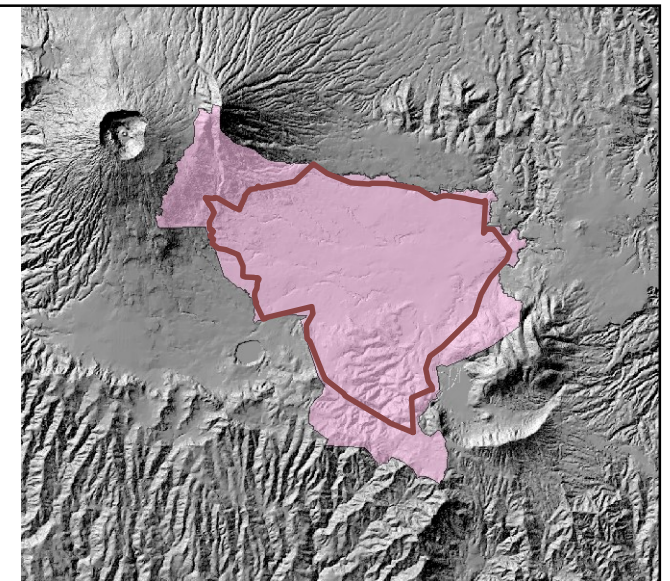
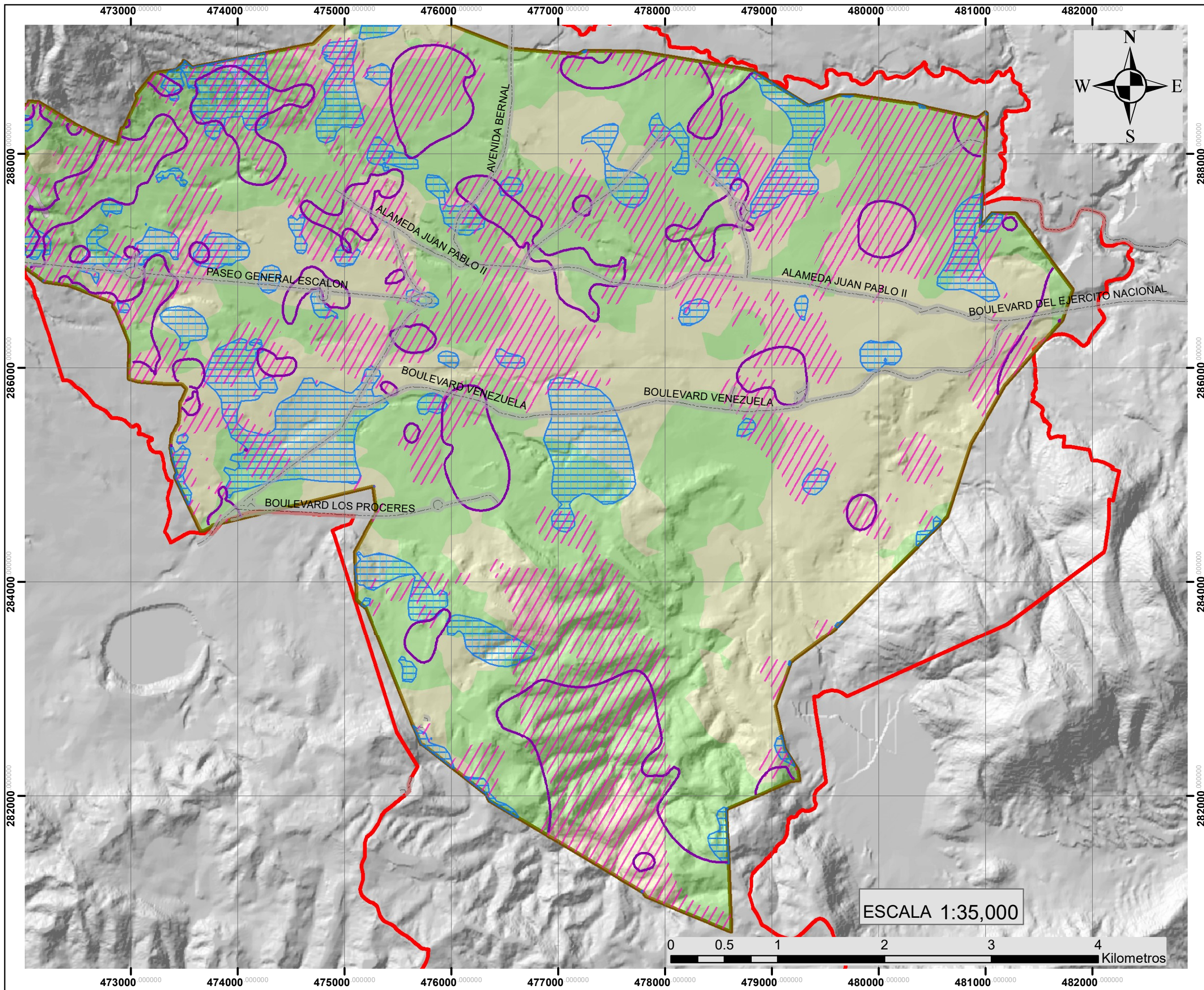
- Seguridad Estructural Cimientos (SE-C), (2008). España.
- Sowers, B. & Sowers, F., (1986). Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa, México.
- UNESCO-IAEG, (1976). Engineering Geological Mapping. A guide to their preparation. Commission on Engineering Geological Maps of the IAEG. Earth Science.



## **ANEXOS**

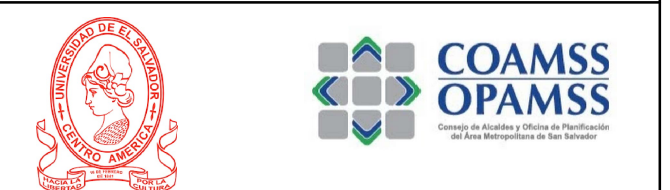
**ANEXO No.1:** MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR.





### MAPA DE CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL MUNICIPIO DE SAN SALVADOR

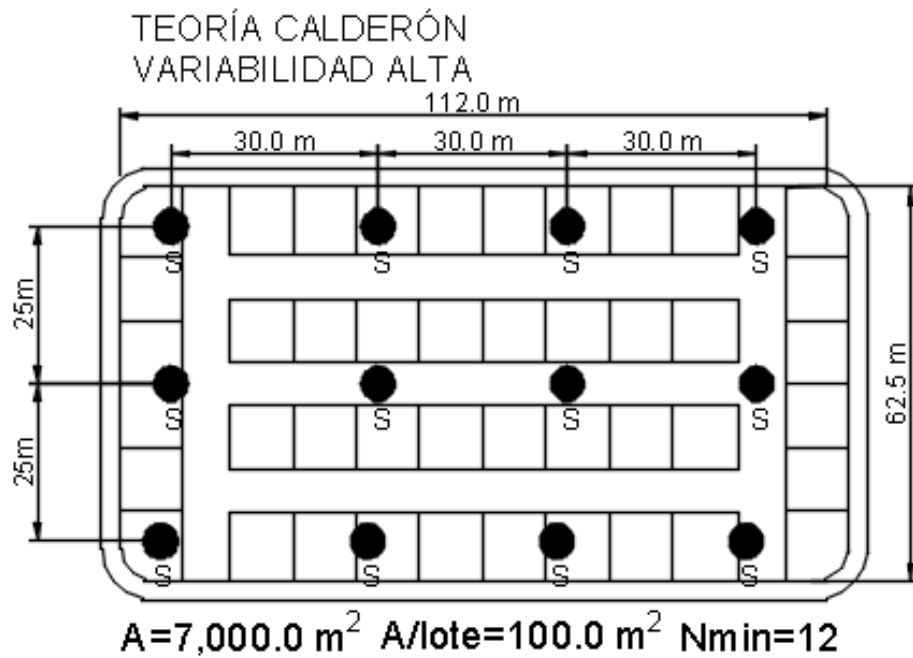
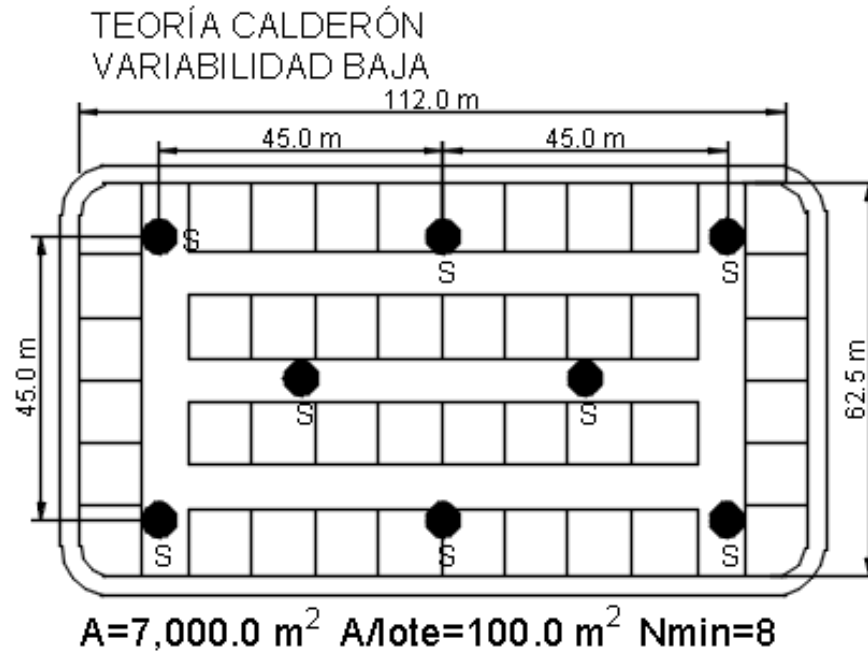
- Leyenda**
- Clasificación de suelos a 2.0m**
- Limos arenosos (ML) con presencia en algunas zonas SM
  - Arenas limosas (SM)
  - Arenas (S)
- Contenido de humedad a 2.0m**
- W% >=30%
- N campo a 2.0 m**
- >30 golpes
- Compacidad de los suelos**
- Suelo denso 5.0m
- Calles y avenidas**
- Calles y avenidas
- LIMITE**
- LIMITE
- PERIMETRO SS**
- PERIMETRO SS



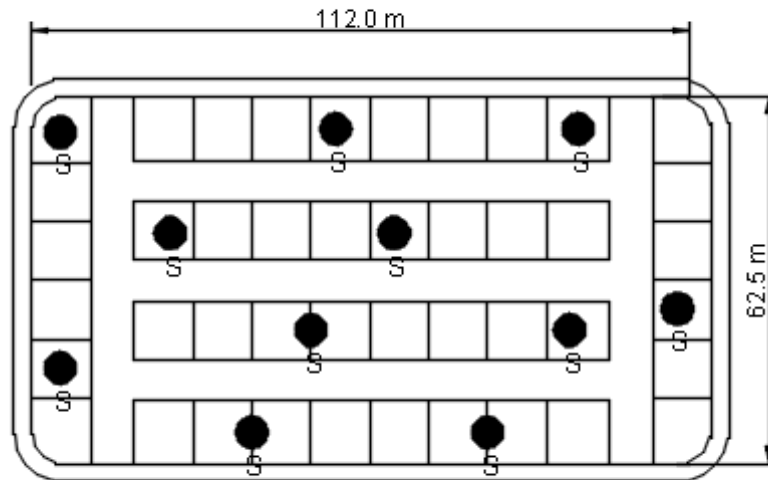
<b>MAPA N°</b>  <b>1</b>	<b>FUENTE:</b> OPAMSS
	<b>ELABORADO POR:</b> KARLA ESCALANTE KARLA LÓPEZ ALEJANDRO ZEPEDA
	<b>FECHA:</b> 02/05/18



**ANEXO No.2:** Ejercicio realizado en urbanizaciones para determinar cantidad mínima de sondeos.

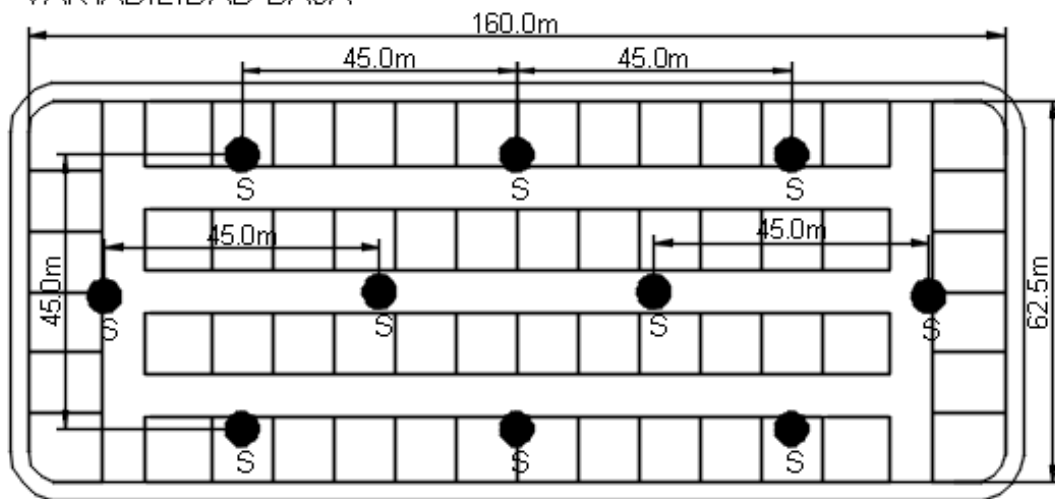


### ESPECIALISTAS



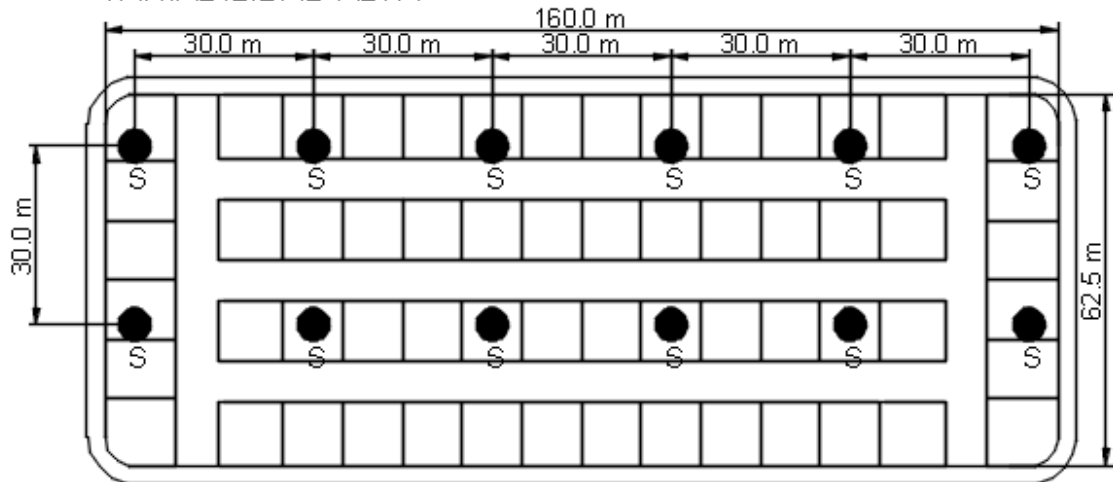
$A=7,000.0m^2$   $A/ote=100.0m^2$   $Nmin=11$

### TEORÍA CALDERÓN VARIABILIDAD BAJA



$A=10,000.0m^2$   $A/ote=100.0m^2$   $Nmin=10$

TEORÍA CALDERÓN  
VARIABILIDAD ALTA

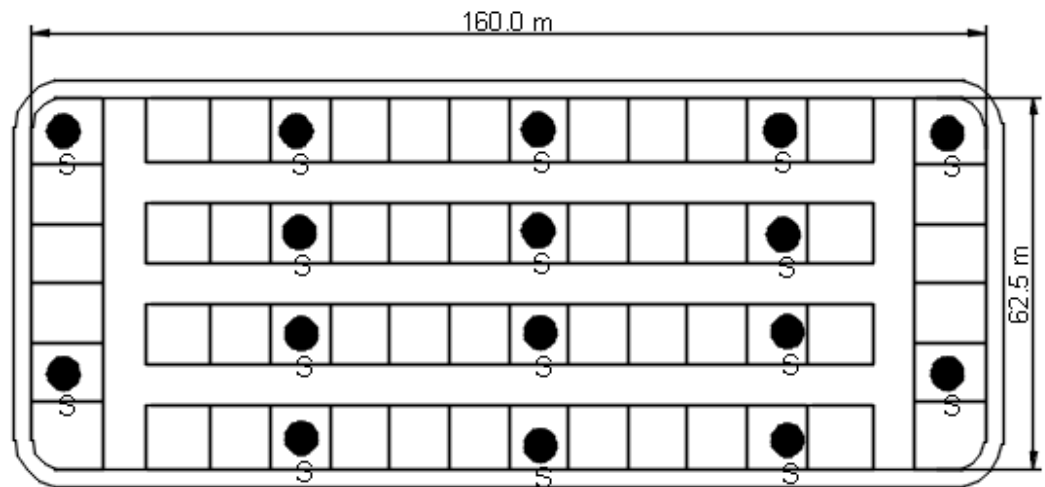


$A=10,000.0 \text{ m}^2$

$A_{\text{lote}}=100.0 \text{ m}^2$

$N_{\text{min}}=12$

ESPECIALISTAS



$A=10,000\text{m}^2$

$A_{\text{lote}}=100\text{m}^2$

$N_{\text{min}}=16$

## EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE SONDEOS EN URBANIZACIÓN SAN GABRIEL

