

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS DE LOS SUELOS DE LA AVENIDA  
LONGITUDINAL DE OCCIDENTE CON AVENIDA AMÉRICAS EN LA CIUDAD DE  
BOGOTÁ

RICHARD ALFREDO SIERRA CORREDOR  
MARITZA RIVERA GIL

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2015

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS DE LOS SUELOS DE LA AVENIDA  
LONGITUDINAL DE OCCIDENTE CON AVENIDA AMÉRICAS EN LA CIUDAD DE  
BOGOTÁ

RICHARD ALFREDO SIERRA CORREDOR  
MARITZA RIVERA GIL

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil.

Asesor Disciplinar:  
Ing. Edison Ferney Garzón Montaña

Asesor Metodológico:  
Lic. Laura Milena Cala

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C  
2015

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
<b>3 JUSTIFICACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>4 MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>15</b>
<b>4.1 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>15</b>
4.1.1 Aspectos Generales	15
4.1.2 Propiedades Dinámicas de los Suelos	16
4.1.2.1 Módulo de Corte (G)	16
4.1.2.2 Razón de Amortiguamiento ( $\beta$ )	18
4.1.2.3 Relación de Poisson ( $\mu$ )	19
4.1.2.4 Factores que inciden sobre los valores de G y $\beta$	20
4.1.2.5 Velocidades ondulatorias de los suelos	21
4.1.3 Ensayos de campo y laboratorio para medir propiedades dinámicas de los suelos	25
4.1.3.1 Ensayo triaxial cíclico	25
4.1.3.2 Ensayo de columna resonante	26
4.1.3.3 Ensayo down-hole	27
4.1.3.4 Ensayos penetrométricos	29
4.1.4 Modelación de las propiedades dinámicas	29
4.1.4.1 Curvas Dinámicas propuestas por Vucetic y Dobry (1991) a partir del índice de plasticidad del material	31
4.1.4.2 Curvas dinámicas propuestas por Roblee y Chiou	32
4.1.4.3 Modelo tipo Masing	36
<b>4.2 MARCO GEOGRÁFICO</b>	<b>40</b>
<b>4.3 MARCO LEGAL</b>	<b>42</b>
4.3.1 Microzonificación sísmica de Bogotá	42
4.3.2 NSR 10 – Título H	45
<b>5 DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>47</b>

<b>5.1</b>	<b>ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>TIPO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>FASES DE LA INVESTIGACIÓN</b>	<b>47</b>
5.3.1	Fase 1. Seleccionar la información de pruebas de campo y ensayos de laboratorio realizados a los suelos de la zona de estudio.	47
5.3.2	Fase 2. Caracterizar estática y dinámicamente los suelos de la zona de estudio.	48
5.3.3	Fase 3. Elaborar las curvas dinámicas de los suelos de la zona de estudio, aplicando el modelo tipo Masing.	48
5.3.4	Fase 4. Comparar las curvas dinámicas de los suelos de la zona de estudio, con las propuestas por Vucetic y Dobry (1991), las presentadas en la microzonificación sísmica Bogotá (2010), las de la Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis en la Ciudad de Bogotá y las de un depósito de arcillas de la Ciudad de México.	48
<b>6</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>INFORMACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LOS SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>50</b>
6.1.1	Resultados de ensayos para caracterización estática	50
6.1.2	Resultados de ensayos para caracterización dinámica	52
6.1.2.1	Down Hole (ANEXO 2.)	52
6.1.2.2	Ensayo de penetración estándar (SPT) (ANEXO 3.)	53
6.1.2.3	Triaxial cíclico con deformación controlada	56
<b>6.2</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>63</b>
6.2.1	Parámetros Estáticos	68
6.2.2	Parámetros Dinámicos	69
6.2.3	Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte	69
<b>6.3</b>	<b>CURVAS DINÁMICAS</b>	<b>70</b>
6.3.1	Curvas dinámicas típicas de la microzonificación sísmica (2010) para arcillas de la sabana de Bogotá.	70
6.3.2	Curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento sin normalizar	72
6.3.2.1	Curvas dinámicas sin normalizar estrato 1. (0 - 12m).	72
6.3.2.2	Curvas dinámicas sin normalizar estrato 2. (12 - 38m).	73
6.3.2.3	Curvas dinámicas sin normalizar estrato 3. (38 - 50m.)	75
6.3.3	Curvas normalizadas de Módulo de corte G vs Deformación Y	76
6.3.3.1	Estrato 1 Profundidad 0 - 12 m	77
6.3.3.2	Estrato 2 Profundidad 12 - 38 m	78
6.3.3.3	Estrato 3 Profundidad 38 - 50 m	79
6.3.3.4	Comparación de las curvas de degradación de módulo de corte	80
6.3.4	Curvas de Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación Y	81
6.3.4.1	Estrato 1 Profundidad 0 - 12 m	81
6.3.4.2	Estrato 2 Profundidad 12 - 38 m	82
6.3.4.3	Estrato 3 Profundidad 38 - 50 m	83

6.3.4.4	Comparación de las curvas Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación	84
<b>6.4</b>	<b>COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DINÁMICAS DE LA AV. LONGITUDINAL DE OCCIDENTE CON AVENIDA AMÉRICAS, CON LAS DE LA AVENIDA BOYACÁ CON AVENIDA MUTIS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y LAS MUESTRAS DE ARCILLA DE LA CIUDAD DE MÉXICO</b>	<b>85</b>
6.4.1	Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis	85
6.4.1.1	Caracterización geotécnica Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis	85
6.4.1.2	Curvas dinámicas Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis	87
6.4.1.3	Curvas de Módulo de corte G vs Deformación Y	87
6.4.1.4	Curvas de Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación Y	89
6.4.2	Comparación curvas dinámicas Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas y Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis en la ciudad de Bogotá.	91
6.4.3	Depósitos de Arcillas de la Ciudad de México	92
6.4.3.1	Características de los depósitos lacustres de la Ciudad de México	93
6.4.3.2	Curvas dinámicas arcillas de la Ciudad de México	94
6.4.4	Comparación curvas dinámicas Av. Longitudinal de Occidente con Ciudad de México.	96
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>101</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Respuesta de un suelo sometido a una carga cíclica.....	17
Figura 2. Fronteras de comportamiento para Amortiguamiento ( $\beta$ ). .....	19
Figura 3. Pruebas de campo y laboratorio para medir propiedades dinámicas de los suelos	25
Figura 4. Ensayos geofísicos de sondajes para determinar la velocidad de las ondas sísmicas.....	27
Figura 5. Esquema del ensayo down-hole.....	28
Figura 6. Fronteras de comportamiento para G y $\beta$ . .....	30
Figura 7. Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y la deformación cíclica.....	30
Figura 8. Variación del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la profundidad y la deformación. ....	31
Figura 9. Módulo de corte vs Deformación .....	31
Figura 10. Amortiguamiento vs Deformación.....	32
Figura 11. Gráfica G/Gmax vs Deformación – Grano fino de baja plasticidad.....	34
Figura 12. Gráfica G/Gmax vs Deformación – Grano fino de alta plasticidad.....	34
Figura 13. Gráfica Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación – Grano fino de baja plasticidad .....	35
Figura 14. Gráfica Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación – Grano fino de alta plasticidad .....	35
Figura 15. Modelos de comportamiento y análisis de respuesta de suelos.....	36
Figura 16. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro $\gamma_r$ .....	38
Figura 17. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro A. ....	39
Figura 18. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro B .....	39
Figura 19. Localización General del proyecto.....	41
Figura 20. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica.....	42
Figura 21. Mapa de zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá.....	44
Figura 22. Gráfica Tiempo vs Profundidad (Down hole) .....	53
Figura 23. Grafica Velocidad de onda cortante Vs – Profundidad (SPT) .....	55
Figura 24. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 4.5 - 5 m de profundidad.....	56
Figura 25. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 4.5 - 5 m de profundidad.....	57
Figura 26. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 14.5 - 15 m de profundidad ...	58
Figura 27. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 14.5 - 15 m de profundidad ..	58
Figura 28. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 22.5 - 23 m de profundidad ...	59
Figura 29. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 22.5 - 23 m de profundidad ..	60
Figura 30. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 34.5 - 35 m de profundidad ...	61
Figura 31. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 34.5 - 35 m de profundidad ..	61
Figura 32. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 44 – 44.5 m de profundidad ..	62
Figura 33. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 44 – 44.5 m de profundidad..	63
Figura 34. Gráfica Tiempo ( $t^*$ ) vs Profundidad .....	66

Figura 35. Velocidades de onda de corte Vs promedio por estrato vs Profundidad a partir de Down-Hole .....	67
Figura 36. Curvas dinámicas típicas de la microzonificación sísmica para arcillas típicas de la Sabana de Bogotá .....	71
Figura 37. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.) .....	72
Figura 38. Amortiguamiento sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.).....	73
Figura 39. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.) .....	74
Figura 40. Curvas amortiguamiento sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.) .....	74
Figura 41. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.) .....	75
Figura 42. Curvas amortiguamiento sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.) .....	76
Figura 43. Gráfica G/Gmax vs Deformación - Estrato 1 .....	77
Figura 44. Gráfica G/Gmax vs Deformación - Estrato 2.....	78
Figura 45. Gráfica G/Gmax vs Deformación - Estrato 3.....	79
Figura 46. Gráfica comparativa curvas de degradación de módulo de corte .....	80
Figura 47. Gráfica Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación – Estrato 1 .....	81
Figura 48. Gráfica Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación – Estrato 2.....	82
Figura 49. Gráfica Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación – Estrato 3.....	83
Figura 50. Gráfica comparativa curvas Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación.....	84
Figura 51. Gráfica comparativa curvas de degradación de módulo de corte Av. Boyacá con Av. Mutis .....	88
Figura 52. Gráfica comparativa curvas Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación Av. Boyacá con Av. Mutis .....	90
Figura 53. Comparación Módulo cortante vs Deformación .....	91
Figura 54. Comparación Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación .....	92
Figura 55. Perfiles de datos mineralógicos de la zona lacustre de la ciudad de México.....	93
Figura 56. Curva de degradación de módulo de corte para un depósito de arcilla de la ciudad de México. ....	94
Figura 57. Curva de Amortiguamiento vs Deformación para un depósito de arcilla de la ciudad de México.....	95
Figura 58. Curva de degradación de módulo de corte .....	96
Figura 59. Gráfica Amortiguamiento vs Deformación.....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros que afectan a $G$ y $\beta$ .....	20
Tabla 2. Ecuaciones empíricas de correlación $n$ del SPT con la velocidad de ondas de corte vs.....	23
Tabla 3. Clasificación de los perfiles de suelo.....	24
Tabla 4. Criterios para clasificar suelos dentro de los perfiles de suelo C, D o E.....	24
Tabla 5. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica.....	43
Tabla 6. Descripción de las zonas de respuesta sísmica.....	45
Tabla 7. Resultados de ensayos para caracterización estática (ANEXO3.).....	51
Tabla 8. Resultados ensayo Down Hole.....	52
Tabla 9. Resultados ensayo SPT.....	54
Tabla 10. Resultados ensayo triaxial para 4.5 – 5 m de profundidad.....	56
Tabla 11. Resultados ensayo triaxial para 14.5 – 15 m de profundidad.....	57
Tabla 12. Resultados ensayo triaxial para 22.5 – 23 m de profundidad.....	59
Tabla 13. Resultados ensayo triaxial para 34.5 – 35 m de profundidad.....	60
Tabla 14. Resultados ensayo triaxial para 44 – 44.5 m de profundidad.....	62
Tabla 15. Datos del ensayo Down Hole y Calculo de $V_s^*$ con el método de los tiempos corregidos $t^*$ .....	65
Tabla 16. Estratos propuestos a partir de $V_s$ .....	67
Tabla 17. Parámetros Estáticos.....	68
Tabla 18. Parámetros Dinámicos.....	69
Tabla 19. Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte.....	70
Tabla 20. Módulo de corte sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.).....	72
Tabla 21. Amortiguamiento sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.).....	73
Tabla 22. Módulo de corte sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.).....	73
Tabla 23. Amortiguamiento sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.).....	74
Tabla 24. Módulo de corte sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.).....	75
Tabla 25. Amortiguamiento sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.).....	75
Tabla 26. Normalización módulo de corte - Estrato 1.....	77
Tabla 27. Normalización módulo de corte - Estrato 2.....	78
Tabla 28. Normalización módulo de corte - Estrato 2.....	79
Tabla 29. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 1.....	81
Tabla 30. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 2.....	82
Tabla 31. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 3.....	83
Tabla 32. Resumen de parámetros dinámicos de la Av. Boyacá con Av. Mutis.....	86
Tabla 33. Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte Av. Boyacá con Av. Mutis.....	87
Tabla 34. Normalización módulo de corte - Estrato 1.....	87

Tabla 35. Normalización módulo de corte - Estrato 2.....	88
Tabla 36. Normalización módulo de corte - Estrato 3.....	88
Tabla 37. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 1.....	89
Tabla 38. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 2.....	89
Tabla 39. Normalización Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación - Estrato 3.....	90
Tabla 40. Estratigrafía general de la ciudad de México .....	93

## INTRODUCCIÓN

El consejo académico en el artículo 3 del Acuerdo No.004 del 23 de mayo de 2013, por el cual se establecen las modalidades de grado, sus requisitos y criterios para la Universidad La Gran Colombia, presenta la modalidad de monografía de grado donde motiva a los estudiantes a fomentar la realización de trabajos investigativos propios de su formación, la habilidad para integrar conocimiento y métodos al buscar alternativas de soluciones a problemas planteados.

El presente proyecto de investigación, busca determinar las propiedades dinámicas de los suelos de la Avenida Longitudinal de Occidente con Avenida Américas en la ciudad de Bogotá, por medio de una caracterización estática y dinámica a partir de los resultados de los ensayos realizados por la firma CEI S.A. Lo anterior con el fin de realizar la modelación correspondiente al comportamiento que presenta el módulo de corte y el amortiguamiento con respecto a la deformación frente a una carga sísmica, en cada uno de los estratos que conforman el perfil de la zona de estudio y así facilitar datos para un futuro análisis de respuesta local.

Posteriormente, se realiza la comparación del comportamiento de las propiedades dinámicas de los suelos de la Avenida Longitudinal de Occidente por Avenida Américas, con las correspondientes a su zona dentro de la microzonificación sísmica de Bogotá (2010), los de la Avenida Boyacá por Avenida José Celestino Mutis en la Ciudad de Bogotá y las de un depósito característico de arcillas de la Ciudad de México; lo anterior con el fin de comprobar si la información proporcionada en la microzonificación sísmica de Bogotá concuerda con los encontrados in situ y a su vez analizar su comportamiento respecto a otro material aparentemente similar de otra ciudad importante como lo es Ciudad de México.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia se encuentra en una posición geográfica muy vulnerable, ya que está ubicada cerca al cinturón de fuego del Pacífico (zona sobre la tierra con mayor actividad sísmica), sobre la confluencia de tres placas tectónicas importantes (Nazca, Suramericana y Del Caribe), y a su vez es afectada por la subducción de la placa Nazca bajo la placa suramericana, esta posición geográfica genera unas zonas de amenaza sísmica considerable.

Los sismos inducen principalmente en el terreno esfuerzos de tipo cortante y los daños son generados debido a que el suelo va perdiendo su resistencia a tales esfuerzos, llegando a un punto al que su comportamiento se asemeja al de un líquido viscoso perdiendo su capacidad de soportar estructuras.<sup>1</sup>

Debido a las condiciones geológicas y geotécnicas que presenta el territorio colombiano, la normatividad que rige la construcción en el país, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, ubica a la ciudad de Bogotá en la zona de amenaza sísmica intermedia, pero muy cercana al límite de la zona de amenaza alta.

La Avenida Longitudinal de Occidente (ALO), es una vía que está proyectada para atravesar la ciudad de Bogotá por todo el borde occidental, comenzando de sur a norte en el sector de Chusacá en cercanía del Rio Bogotá, pasando por el municipio de Soacha, y luego por las localidades de Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá y Suba, terminando en el sector de La Caro en el Municipio de Chía.

La NSR-10, recomienda realizar una caracterización sísmica detallada de la zona, adicional a la suministrada en la microzonificación sísmica de Bogotá (2010), que determine las condiciones y los parámetros dinámicos específicos de los suelos en donde se planeen diseñar y construir obras de infraestructura de esta magnitud.

---

<sup>1</sup> CEPEDA, Diana. Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio. Trabajo de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2010. 2 p.

El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en el año 2006, contrató a la firma CEI S.A. para realizar la revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. La firma mencionada realizó pruebas de campo y ensayos de laboratorio en varios puntos de este tramo, sin embargo, en estos estudios no se determinaron la totalidad de variables y análisis en las propiedades dinámicas del suelo en la Avenida Longitudinal de Occidente con Avenida Américas.

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación

¿Cuáles son los parámetros dinámicos, que se deben tener en cuenta en el diseño de las obras de ingeniería que se planean construir en la intersección Avenida Longitudinal de Occidente (ALO) por Avenida Américas?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar los parámetros dinámicos de los suelos de la Avenida Longitudinal de Occidente en la intersección con la Avenida Américas en la ciudad de Bogotá.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar y seleccionar la información de pruebas de campo y ensayos de laboratorio realizados a los suelos de la zona de estudio.
- Caracterizar estática y dinámicamente los suelos de la zona de estudio.
- Elaborar las curvas dinámicas correspondientes a los suelos de la zona de estudio, aplicando el modelo tipo Masing.
- Comparar las curvas dinámicas de los suelos de la zona de estudio, con las de la microzonificación sísmica de Bogotá, las de la Avenida Boyacá por Avenida José Celestino Mutis en la Ciudad de Bogotá y las de un depósito de arcillas de la Ciudad de México.

### 3 JUSTIFICACIÓN

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), enfatiza en la necesidad de realizar un estudio sísmico detallado y más para ciudades o poblaciones que según la zonificación hecha para el territorio colombiano, se encuentran en una zona de amenaza sísmica alta o intermedia, para lo cual solicitó a las ciudades importantes ubicadas en zonas de amenaza sísmica importante tener una microzonificación sísmica. La ciudad de Bogotá cuenta con microzonificación sísmica desde el año 1997 elaborado por Ingeominas y la Universidad de los Andes con actualización y ajustes en el 2010 mediante el decreto 523 de la Alcaldía mayor de Bogotá. La NSR-10, recomienda que se realice un análisis de amenaza sísmica detallado y se trabaje con valores más cercanos al comportamiento real que con las constantes propuestas en la microzonificación sísmica de Bogotá (2010) para proyectos de gran importancia y magnitud como la obra objeto de estudio.

La determinación de los parámetros sísmicos del suelo es una tarea de vital importancia para el óptimo desarrollo y funcionamiento de los diseños y obras de ingeniería, como lo requiere la norma esta importancia es directamente proporcional al tipo de proyecto, a la zona donde este se ubique, y a la cantidad de usuarios para los cuales está destinado su servicio. Por lo anterior un proyecto como la Avenida Longitudinal de Occidente, el cual está proyectado para atravesar toda la ciudad de Bogotá y que representa una importante alternativa de solución a los problemas de movilidad que la ciudad enfrenta hoy, como también una alternativa de desarrollo económico, educativo y cultural, debido las diferentes obras de infraestructura que allí se planean construir, cuente con una correcta caracterización dinámica de los suelos pertenecientes a todo su corredor.

Por medio de este proyecto de investigación, se busca realizar una caracterización dinámica a los suelos de la intersección Avenida Longitudinal de Occidente por Avenida Américas, para que los parámetros y criterios aquí obtenidos, puedan ser tenidos en cuenta en posteriores estudios, diseños y construcción de una glorieta a nivel con un paso elevado y demás obras de ingeniería que se tienen proyectadas para este sitio, y así garantizar un correcto funcionamiento de la obra ante la posible ocurrencia de fenómenos sísmicos.

## 4 MARCO DE REFERENCIA

### 4.1 MARCO CONCEPTUAL

#### 4.1.1 Aspectos Generales

Dada la complejidad de un suelo, conformado por tres estados de la materia combinados en un solo material, sólido, líquido y gaseoso, su comportamiento estático y dinámico necesariamente debe ser de mayor complejidad que el de aquellos materiales en los cuales alguna, o algunas de las tres fases carece de importancia, o tiene una importancia relativa definitivamente inferior. Por esta razón el comportamiento dinámico de los suelos es apenas parcialmente conocido en la actualidad, a pesar de los esfuerzos realizados para su mejor conocimiento. Lo que sí está claramente establecido es la fuerte no linealidad de las relaciones esfuerzo contra deformación de los suelos en la mayoría de los casos.<sup>2</sup>

De acuerdo con Whitman, el comportamiento general de los suelos sometidos a efectos sísmicos puede sintetizarse así:

- a. Para muy pequeñas deformaciones angulares, del orden de  $10^{-5}$  o inferiores, el comportamiento de la relación esfuerzo deformación puede considerarse esencialmente lineal, con algo de acción visco-elástica.
- b. Para deformaciones angulares entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$ , los fenómenos de no linealidad empiezan a manifestarse más claramente cuanto mayor es la deformación.
- c. Para deformaciones mayores que  $10^{-3}$ , la no linealidad de la relación esfuerzo contra deformación es muy marcada.<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Bogotá, Universidad de Los Andes, 1990, p. 506.

<sup>3</sup> WHITMAN, Robert. Stress-strain Behavior of Soils During Dynamic Loads, Citado por SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Bogotá, Universidad de Los Andes, 1990, p. 512.

## 4.1.2 Propiedades Dinámicas de los Suelos

La naturaleza y la distribución del daño sísmico están muy influenciadas por la respuesta del suelo frente a cargas cíclicas. Dicha respuesta está controlada en gran medida por las propiedades del suelo. La susceptibilidad de un depósito de suelo para amplificar el movimiento depende de las propiedades dinámicas, siendo el módulo de corte y el amortiguamiento principales parámetros para modelar la respuesta sísmica del suelo. Estos parámetros se relacionan con otras propiedades del suelo, como la presión de poros, la densidad relativa y la velocidad de las ondas de corte<sup>4</sup>.

### 4.1.2.1 Módulo de Corte ( $G$ )

El módulo de corte ( $G$ ) se define como la razón entre la tensión de corte ( $\tau$ ) y la deformación unitaria de corte ( $\gamma$ ). La respuesta de un material a las deformaciones se puede observar en un diagrama tensión – deformación. En un material lineal, la gráfica es una línea recta, mientras que para un material no lineal, la gráfica es una curva.

Los suelos generalmente muestran un comportamiento no lineal, pues son materiales inelásticos e hysteréticos, es decir que al ser sometidos a cargas cíclicas, como las producidas por un terremoto, su respuesta tensión – deformación es un ciclo como se observa en la figura 2. En este diagrama de tensión de corte y deformación unitaria de corte se muestra un ciclo completo (loop), correspondiente a la deformación  $\gamma_1$ . En este ciclo se define el módulo de corte inicial  $G_o$  y el módulo de corte  $G$ , el cual es la pendiente de la recta secante que une los extremos de deformación máxima B y D. El módulo de corte inicial  $G_o$ , es una función de muchos parámetros, tales como la tensión octaédrica normal efectiva ( $\sigma_o$ ), el índice de vacíos ( $e$ ), la trayectoria de tensiones, la edad y la estructura del suelo.

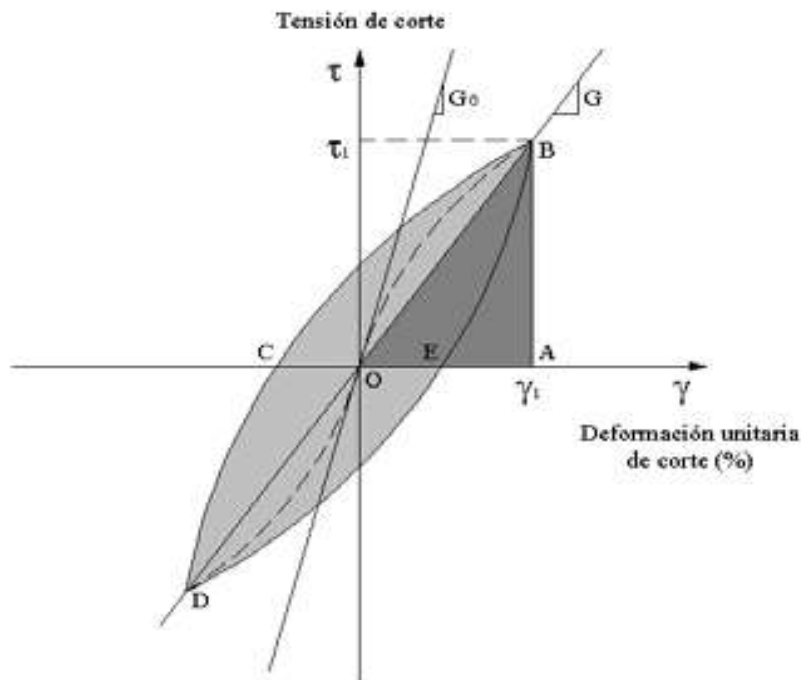
---

<sup>4</sup> SANTIBAÑEZ, Daniel. Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Trabajo de grado Ingeniero Constructor. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería en Construcción. 2006. p. 49.

En un depósito natural homogéneo, el módulo de corte, y por lo tanto la velocidad de las ondas de corte, debe aumentar con la profundidad, debido al aumento de la tensión de sobrecarga de los suelos.<sup>5</sup>

“Entre mayor la deformación tanto menor el valor de  $G$  y mayor el área del ciclo de histéresis, por lo tanto mayor la disipación de energía por ciclo de carga y descarga sobre la muestra”<sup>6</sup>.

Figura 1 Respuesta de un suelo sometido a una carga cíclica



Fuente: SANTIBAÑEZ, Daniel. Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Trabajo de grado Ingeniero Constructor. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería en Construcción. 2006. p. 52.

<sup>5</sup> Ibid., p. 50.

<sup>6</sup> SARRIA. Op. Cit., p. 512.

#### 4.1.2.2 Razón de Amortiguamiento ( $\beta$ )

La razón de amortiguamiento ( $\beta$ ) expresa la capacidad del material para disipar la energía:

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \frac{A_L}{A_T} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_L}{G \cdot \gamma_1^2} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde  $A_L$  es el área del ciclo de carga – descarga, que equivale a la energía perdida o área del loop BCDE en la figura 3, y  $A_T$  es el área del triángulo OAB, que equivale a la energía entregada al suelo, por unidad de volumen, para causar la deformación máxima. Al contrario de lo que ocurre con el módulo de corte, la razón de amortiguamiento aumenta cuando la deformación máxima aumenta. Esto significa que la respuesta del suelo es una función del nivel de sollicitación y que mientras mayor sea la tensión sollicitante más deformable será el suelo y mayor será su capacidad de amortiguamiento. Al contrario de lo que ocurre con el módulo de corte, la razón de amortiguamiento aumenta cuando la deformación máxima aumenta. Esto significa que la respuesta del suelo es una función del nivel de sollicitación y que mientras mayor sea la tensión sollicitante más deformable será el suelo y mayor será su capacidad de amortiguamiento.<sup>7</sup>

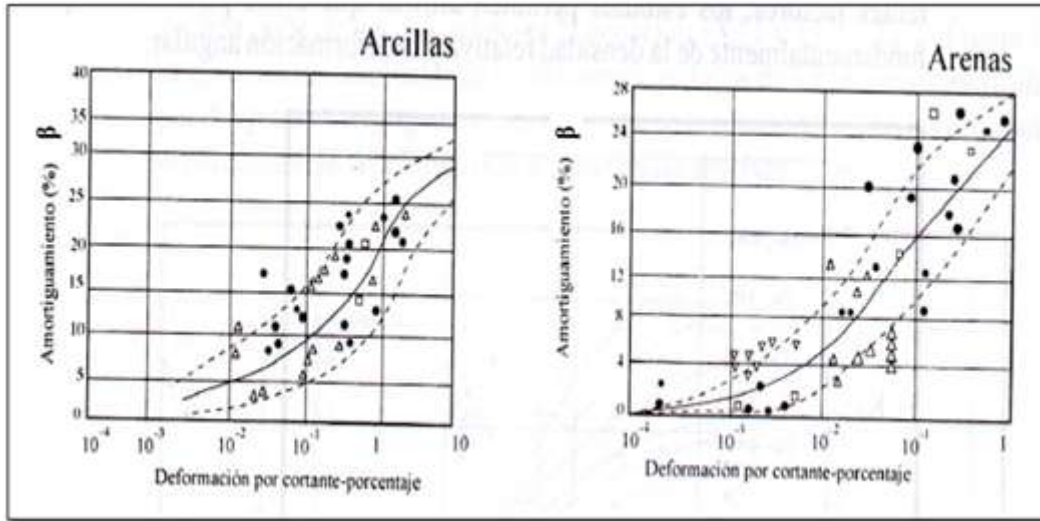
De todas maneras queda claro que el amortiguamiento crece rápidamente con la deformación, pero para deformaciones mayores el crecimiento se desacelerará. Un aspecto importante que queda por discutir es si el amortiguamiento tiende a un valor máximo independiente de la deformación. Teniendo en cuenta la situación práctica correspondiente a los sismos, que introducen cargas intensas con cierta ciclicidad, parece muy razonable que este límite exista puesto que cuando se movilizan las partículas más allá de la deformación correspondiente a la resistencia última al cortante, no hay más fricción que la ya empleada en cada ciclo, esto podría interpretarse diciendo que al producirse la falla, las partículas vuelven a quedar en una situación similar a la de cero esfuerzo, listas para recibir una deformación adicional, es decir un nuevo ciclo de carga, pero en una posición relativa diferente aquella que tenían antes de la falla. En estas condiciones de grandes

---

<sup>7</sup>SANTIBAÑEZ. Op. Cit. p. 52.

deformaciones angulares, la capacidad de disipación quedará dependiendo de alguna manera del estado de esfuerzos.<sup>8</sup>

Figura 5. Fronteras de comportamiento para  $G$  y  $\beta$ .



Fuente: SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Bogotá, Universidad de Los Andes, 1990, p. 482.

#### 4.1.2.3 Relación de Poisson ( $\mu$ )

La relación de Poisson es un parámetro dinámico, se requiere tener en cuenta pero no afecta considerablemente a la respuesta sísmica.<sup>9</sup>

“La relación de Poisson en los suelos o masas pétreas o térreas no es constante, depende del estado de esfuerzos y de las condiciones de confinamiento. La relación de Poisson en suelos cohesivos, valores entre 0.3 y 0.4 son aceptables, mientras que para los suelos granulares 0.35 puede considerarse un valor también adecuado.”<sup>10</sup>

<sup>8</sup> SARRIA, Op. Cit., p. 521.

<sup>9</sup> SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

<sup>10</sup> SARRIA. Op. Cit., p. 515.

#### 4.1.2.4 Factores que inciden sobre los valores de $G$ y $\beta$

Tanto para el estudio del módulo  $G$ , como del amortiguamiento y la relación de Poisson, los investigadores del tema han tenido que considerar una serie de parámetros que a primera vista saltan como relevantes. Puede suponerse que el nivel de esfuerzos no es lo único importante, puede haber contribución del número de ciclos, del tipo de material y de una gran cantidad de factores.<sup>11</sup>

Tabla 1. Parámetros que afectan a  $G$  y  $\beta$

PARÁMETRO	IMPORTANCIA PARA			
	G		$\beta$	
	I	II	I	II
Amplitud de la deformación	****	****	****	****
Esfuerzo principal efectivo promedio	****	****	****	****
Relación de vacíos	****	****	****	****
Envolvente de resistencia efectiva	****	****	****	****
Esfuerzo cortante octaédrico	****	****	****	****
Número de ciclos de carga	***	***	****	****
Grado de saturación	***	****	****	**
Relación de sobreconsolidación	***	****	***	****
Frecuencia de la carga > 0.1 Hertz	***	***	***	****
Otros factores del tiempo (tixotropía)	***	****	***	****
Características granulares "	***	***	***	***
Estructura del suelo	***	***	***	***
Cambio de volumen de esfuerzos $\tau$	**	**	**	**

Columna I Arenas limpias

Columna II Suelos cohesivos

**\*\*\*\* Muy importante; \*\*\* Menor importancia relativa; \*\* Importancia no plenamente conocida o desconocida; Tamaño, forma, gradación y mineralogía.**

Fuente: SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Bogotá, Universidad de Los Andes, 1990, p. 515.

<sup>11</sup> SARRIA. Op. Cit., p. 515.

#### 4.1.2.5 **Velocidades ondulatorias de los suelos**

##### 4.1.2.5.1 Tipos de ondas sísmicas

Según Sauter<sup>12</sup>, existen dos tipos principales de ondas, las **ondas internas o de cuerpo** que se propagan a través del medio sólido de la tierra y las **ondas de superficie**, que se propagan por la superficie de la tierra.

- **Ondas internas o de cuerpo**

- Ondas primarias u ondas P*: Hacen vibrar una partícula en el sentido de propagación de las ondas; su movimiento es similar al de las ondas sonoras, comprimiendo y dilatando alternativamente el medio sólido a través del cual viajan, se les denomina longitudinales o de compresión.
- Ondas secundarias u ondas S*: Hacen vibrar una partícula en sentido perpendicular a la trayectoria de las ondas, produciendo esfuerzos de corte en el medio sólido en el que se propagan. Se les denomina ondas transversales o de corte. No se propagan a través de medios líquidos.

- **Ondas de superficie**

- Ondas Love u ondas L*: Su movimiento es similar al de las ondas S, haciendo vibrar la partícula horizontalmente en sentido perpendicular a la dirección de propagación, sin movimiento vertical.
- Ondas Rayleigh u ondas R*: Su movimiento es similar al de las ondas en el agua, haciendo vibrar una partícula sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimiento elíptico horizontal y vertical simultáneamente.

---

<sup>12</sup> SAUTER, Franz. Introducción a la sismología. Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1989, p. 53.

#### 4.1.2.5.2 Velocidad de propagación de las ondas

La velocidad de propagación de las ondas sísmicas depende de la densidad y propiedades elásticas del material a través del cual se transmiten.

Las ondas P se transmiten a mayor velocidad que las ondas S. Cerca de la fuente las ondas P tienen una componente vertical mayor, las ondas S tienen mayor amplitud y contenido de energía, es por esto que causan mayor daño a las estructuras. La velocidad de propagación aumenta con la profundidad, y en el interior de la tierra es mucho mayor, para las ondas P es del orden de 13.6 Km/s mientras en la superficie es de 5.5Km/s o menor.<sup>13</sup>

Según Alberto Sarria<sup>14</sup>, la velocidad de onda Vs y Vp, está dada por las siguientes ecuaciones:

$$V_p = [E(1-\nu)/\rho(1+\nu)(1-2\nu)]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$V_s = [G/\rho]^{1/2} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

En donde:  $\nu$  = Relación de Poisson,  $\rho$  = densidad; E = Módulo de Elasticidad y E = Módulo de corte.

A partir del documento Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie, del maestro Lazcano,<sup>15</sup> La relación entre VS y el módulo de cortante (G) está dada por la siguiente ecuación:

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

En donde:  $\rho$  = densidad; VS = velocidad de onda de corte.

A continuación se encuentran otras correlaciones para hallar Vs, en función del ensayo de penetración estándar.

---

<sup>13</sup> SAUTER. Op. Cit., p. 57

<sup>14</sup> SARRIA, Alberto, Métodos Geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Bogotá D.C: Ediciones Uniandes, 1996. p 121

<sup>15</sup> LAZCANO, Salvador. Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. México. 2007, p 9.

Tabla 2. Ecuaciones empíricas de correlación n del SPT con la velocidad de ondas de corte vs.

Investigadores	Ecuación	Observaciones
Imai y Yoshimura (1970)	$V_s = 76N^{0.33}$	
Ohba y Toriumi (1970)	$V_s = 84N^{0.31}$	
Imai (1977)	$V_s = aN^b$	a= 102, b=0.29 Arcilla Holoceno a= 81, b=0.33 Arena Holoceno a= 114, b=0.29 Arcilla Pleistoceno a= 97, b=0.32 Arena Pleistoceno
Ohta y Goto (1978)	$V_s = 85.34N^{0.348}$	Para todo tipo de suelo
Okamoto <i>et al.</i> (1989)	$V_s = 125N^{0.3}$	Arena del Pleistoceno
Japan Road Association (2002)	$V_s = 80N^{1/3}$ $V_s = 100N^{1/3}$	Arenas Arcilla
Vs=velocidad de ondas de corte en m/s; N=numero de golpes del SPT		

Fuente: ALFARO, Andres. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Revista Épsilon, Enero - Junio de 2007, No. 8, p. 13-23.

Estas son otras correlaciones en función del SPT, obtenidas por el ingeniero Andres Alfaro<sup>16</sup>

- $V_s = 91.44h^{0.291} N^{0.298}$  (Ecuación 5)
- $V_s = 99.783 N^{0.383}$  (Ecuación 6)

En las siguientes tablas se encuentra la clasificación de los perfiles de suelo en función de Vs.

<sup>16</sup> ALFARO, Andres. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Revista Épsilon, Enero - Junio de 2007, No. 8, p. 13-23.

Tabla 3. Clasificación de los perfiles de suelo

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

Fuente: ALFARO, Andrés. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Revista Épsilon, Enero - Junio de 2007, No. 8, p. 13-23.

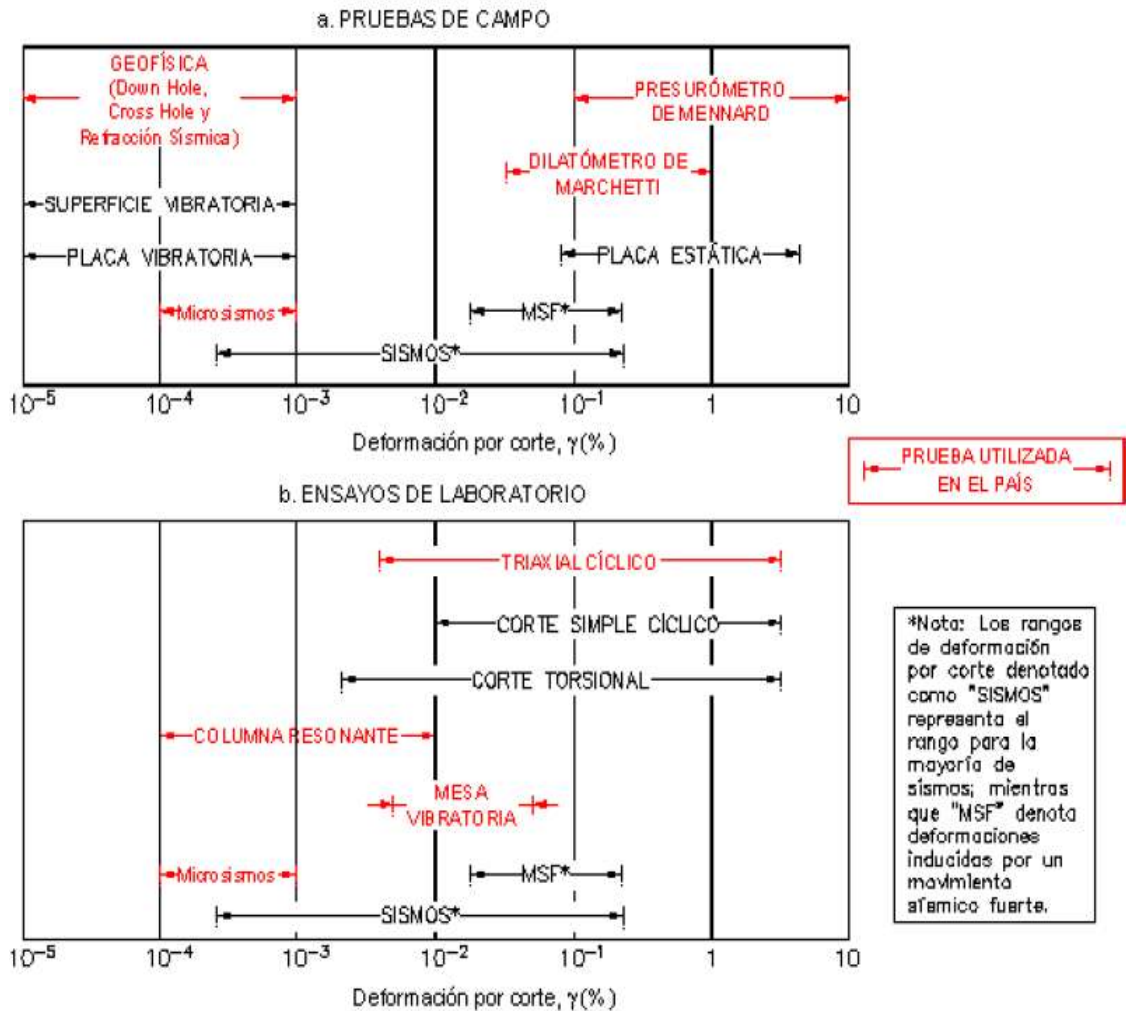
Tabla 4. Criterios para clasificar suelos dentro de los perfiles de suelo C, D o E

Tipo de Perfil	$V_s$	$N$ o $N_{ch}$	$S_u$
<b>C</b>	Entre 360 y 760 m/s	Mayor que 50	Mayor que 100 Kpa ( $\sim 1.0$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>D</b>	Entre 180 y 360 m/s	Entre 15 y 50	Entre 100 y 50 Kpa ( $\sim 0.5$ a $1.0$ kgf/cm <sup>2</sup> )
<b>E</b>	Menor de 180 m/s	Menor de 15	Menor de 50 Kpa ( $\sim 0.5$ kgf/cm <sup>2</sup> )

Fuente: ALFARO, Andrés. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Revista Épsilon, Enero - Junio de 2007, No. 8, p. 13-23.

### 4.1.3 Ensayos de campo y laboratorio para medir propiedades dinámicas de los suelos

Figura 2. Pruebas de campo y laboratorio para medir propiedades dinámicas de los suelos



Fuente: Adaptado de Arango I "Ingeniería sísmica aplicada a problemas geotécnicos". SEGUNDO SEMINARIO COLOMBIANO DE GEOTECNIA. Bogotá. 1980.

#### 4.1.3.1 Ensayo triaxial cíclico

En este ensayo la muestra de suelo se confina en una celda de compresión triaxial en la que es posible aplicar una presión hidrostática de consolidación y un esfuerzo desviador variable en función del tiempo. El esfuerzo desviador se aplica por medio de un pistón que sube y baja accionado por un mecanismo que puede programarse para una carga sinusoidal o para

una carga sísmica de historia conocida. Cada probeta es cargada cíclicamente de manera de obtener una historia de tensiones de corte reversibles en un plano de ella. Las cargas axiales son registradas mediante una celda de carga o un transductor de presión, las deformaciones axiales mediante un transductor lineal (LVDT) y las presiones de poros son medidas mediante un transductor de presiones.

El procedimiento para realizar este ensayo es el siguiente, primero se consolida la probeta de suelo bajo la presión de la cámara triaxial ( $\sigma_0$ ), la cual se mantiene constante durante todo el ensayo, y después se aplica un esfuerzo desviador ( $\sigma_d$ ) que cambia de dirección según la carga programada. Los resultados obtenidos en este ensayo se pueden representar en curvas histeréticas de tensión – deformación. La recta secante que conecta los extremos del loop histerético es el módulo de Young dinámico (E), el cual se puede relacionar con las deformaciones y con el módulo de corte con las siguientes ecuaciones<sup>17</sup>:

$$E = \frac{\sigma_d}{\varepsilon} \quad \gamma = (1 + \mu)\varepsilon \quad G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

#### 4.1.3.2 *Ensayo de columna resonante*

El ensayo de columna resonante consiste en someter una muestra cilíndrica de suelo, que actúa como una columna, a una carga armónica torsional o longitudinal (en la que puede controlarse la amplitud y la frecuencia) por medio de un sistema electromagnético. Inicialmente la frecuencia de carga tiene un valor bajo y se aumenta progresivamente hasta que la amplitud de deformación alcanza un valor máximo.

La probeta de suelo entra en resonancia cuando la frecuencia forzada ( $f$ ) coincide con su frecuencia natural ( $n f$ ). Si se conoce la longitud de onda del primer modo ( $\lambda$ ), se puede calcular la velocidad de onda, por medio de la ecuación:

$$V = \lambda \cdot f \quad \text{(Ecuación 8)}$$

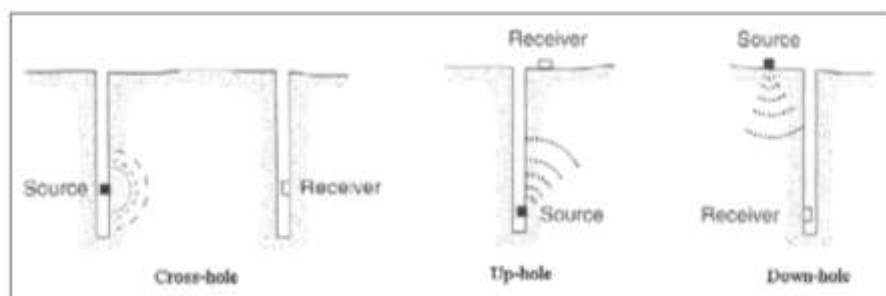
---

<sup>17</sup> SANTIBAÑEZ. Op. Cit.. p. 56.

### Ensayos de campo para medir propiedades dinámicas de los suelos.

Los ensayos de terreno más comunes son aquellos destinados a medir el módulo de corte inicial ( $G_0$ ), es decir la pendiente de la curva tensión – deformación a niveles de deformación muy pequeños, donde el suelo se comporta como material elástico, por lo que también se llaman de baja deformación. Estos ensayos se basan en la generación de ondas y en la determinación de su velocidad de propagación. Los métodos más comunes de este tipo son el Cross-Hole, el Down-Hole y el Up-Hole<sup>18</sup>.

Figura 3. Ensayos geofísicos de sondajes para determinar la velocidad de las ondas sísmicas.



Fuente: SANTIBAÑEZ, Daniel. Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Trabajo de grado Ingeniero Constructor. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería en Construcción. 2006. p. 58.

#### 4.1.3.3 *Ensayo Down-Hole*

El procedimiento down-hole consiste en perforar un sondeo de 7.6 cm de diámetro hasta la profundidad de exploración requerida y proceder a colocar un ademe poco rígido. Se cuela un pequeño bloque de concreto de aproximadamente 0.6 m de lado, como se muestra en la Figura 8.

Se coloca a la profundidad,  $z$ , un geófono de tres componentes dentro del sondeo y se acuña contra el ademe. El impulso se logra mediante el golpe, con un martillo de 4.5 Kg de peso al bloque de concreto. El impacto genera ondas de cuerpo. En un osciloscopio con

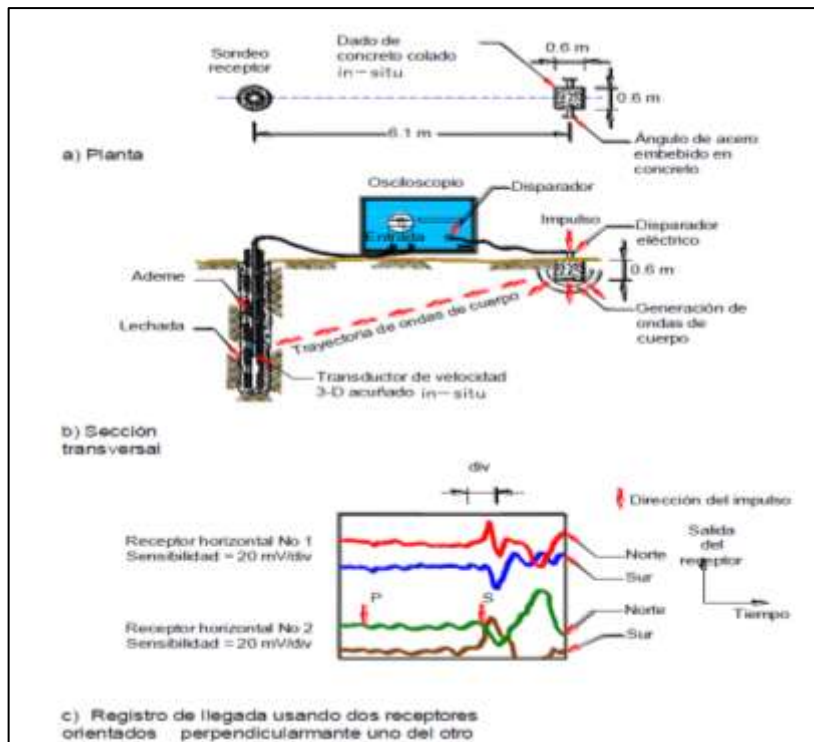
<sup>18</sup>SANTIBAÑEZ. Op. Cit. p. 57.

memoria, se registra la traza del impacto y las trazas de llegada de las ondas del geófono. El procedimiento se repite de cada 1.5 a 3 m, hasta la profundidad final.

Si se conoce el tiempo requerido para que la onda viaje desde el punto de la perturbación al receptor y la distancia entre ambos, se determina la velocidad de propagación de las ondas compresionales,  $V_c$ , o de las ondas de esfuerzo cortante  $V_s$ . Debe tenerse presente que el ensayo mide la velocidad de propagación promedio.<sup>19</sup>

El rango de deformaciones de este tipo de ensayos está comprendido entre  $10^{-1}$  % y  $10^{-3}$  %.

Figura 4. Esquema del ensayo down-hole.



Fuente: Díaz, Jorge. Caracterización dinámica de los suelos – ensayos de campo y laboratorio. En: Curso de actualización en ingeniería sísmica y dinámica de suelos, Universidad Nacional Autónoma de Mexico. p. 64

<sup>19</sup> DIAZ, Jorge. Caracterización dinámica de los suelos – ensayos de campo y laboratorio. En: Curso de actualización en ingeniería sísmica y dinámica de suelos, Universidad Nacional Autónoma de Mexico. p. 16.

#### **4.1.3.4 Ensayos penetrométricos**

La resistencia a la penetración, es un índice relacionado con la densidad, la deformabilidad y la resistencia al corte de un suelo. Así mismo, se han establecido relaciones entre los resultados de estos ensayos y las propiedades dinámicas de los suelos, como la propagación de ondas.

Tienen ventajas sobre otros ensayos de terreno por sus menores costos y mayor disponibilidad de equipos, lo que los hace útiles en las primeras etapas de un proyecto.

El método más usado en las exploraciones de suelos es el Ensayo de Penetración Estándar (SPT).

Otro ensayo muy utilizado es el Ensayo de Penetración de Cono (CPT), el que consiste en hincar una barra con punta cónica a una velocidad determinada. Este ensayo permite medir, por medio de celdas de carga, dos parámetros importantes, la resistencia de punta y la resistencia a la fricción lateral.<sup>20</sup>

Es importante aclarar que en este proyecto de investigación, los ensayos descritos anteriormente no serán realizados por parte de los investigadores. Para la obtención de los parámetros geotécnicos de los suelos en estudio se tomarán los resultados de los ensayos realizados por la firma C.E.I .S.A, para la revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13.

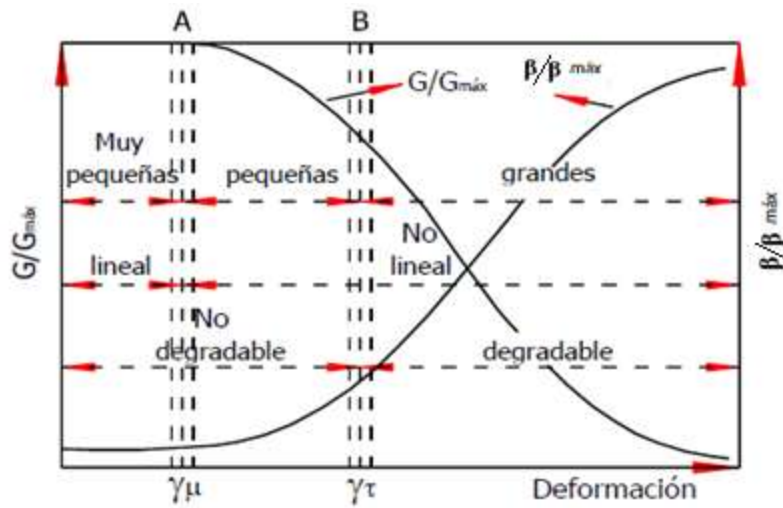
#### **4.1.4 Modelación de las propiedades dinámicas**

Las variaciones del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la deformación se representan por curvas, como se muestra en las siguientes figuras.

---

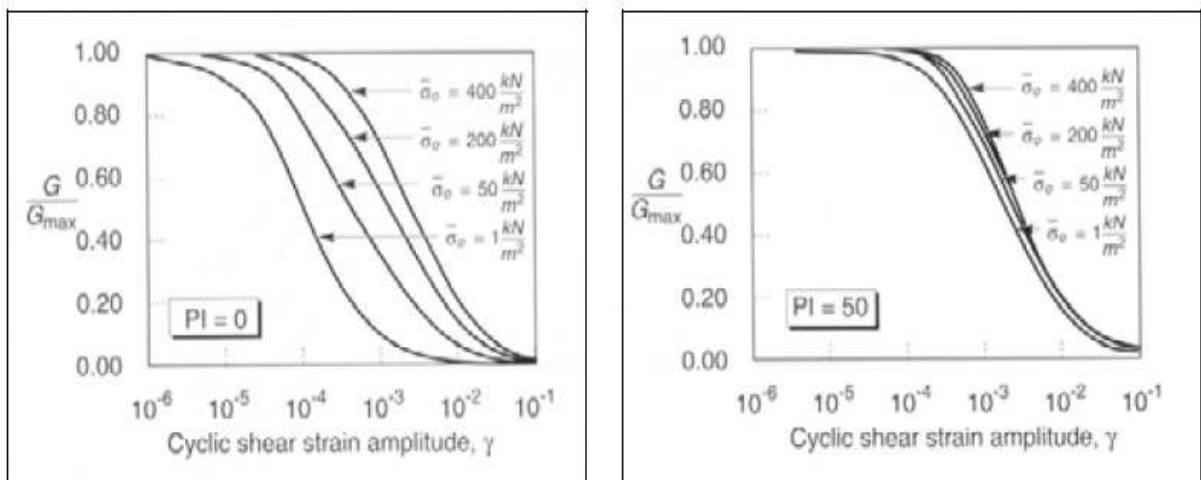
<sup>20</sup> SANTIBAÑEZ. Op. Cit. p. 58.

Figura 5. Fronteras de comportamiento para  $G$  y  $\beta$ .



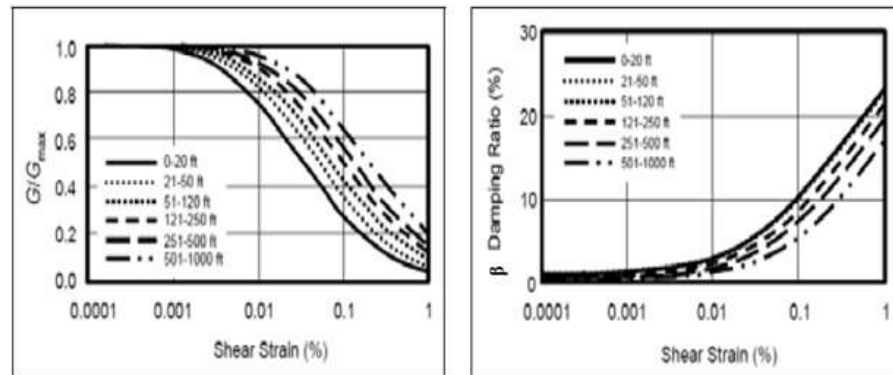
Fuente: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/601/A4.pdf?sequence=4>.

Figura 6. Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y la deformación cíclica.



Fuente: SANTIBAÑEZ, Daniel. Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Trabajo de grado Ingeniero Constructor. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería en Construcción. 2006. p. 54.

Figura 7. Variación del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento en función de la profundidad y la deformación.

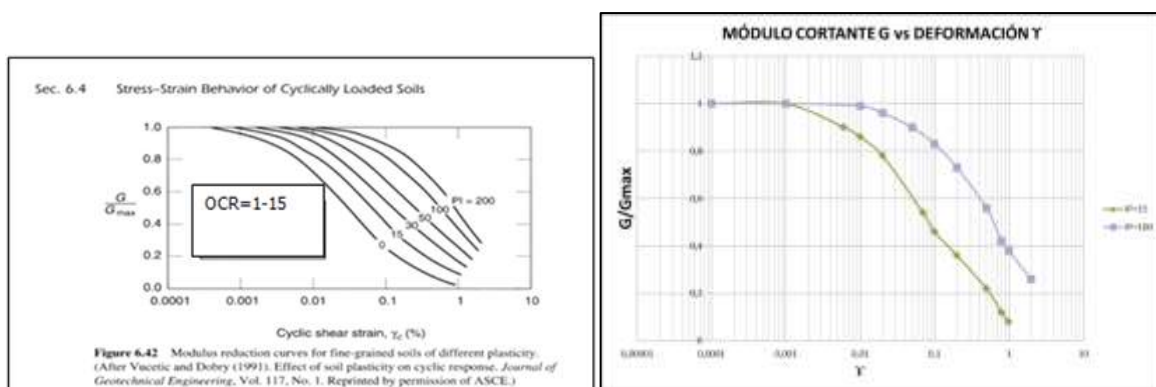


Fuente: SANTIBAÑEZ, Daniel. Determinación del potencial de licuefacción de suelos no cohesivos saturados bajo cargas sísmicas usando el ensayo de penetración estándar. Trabajo de grado Ingeniero Constructor. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Escuela Ingeniería en Construcción. 2006. p. 54.

#### 4.1.4.1 Curvas Dinámicas propuestas por Vucetic y Dobry (1991) a partir del índice de plasticidad del material

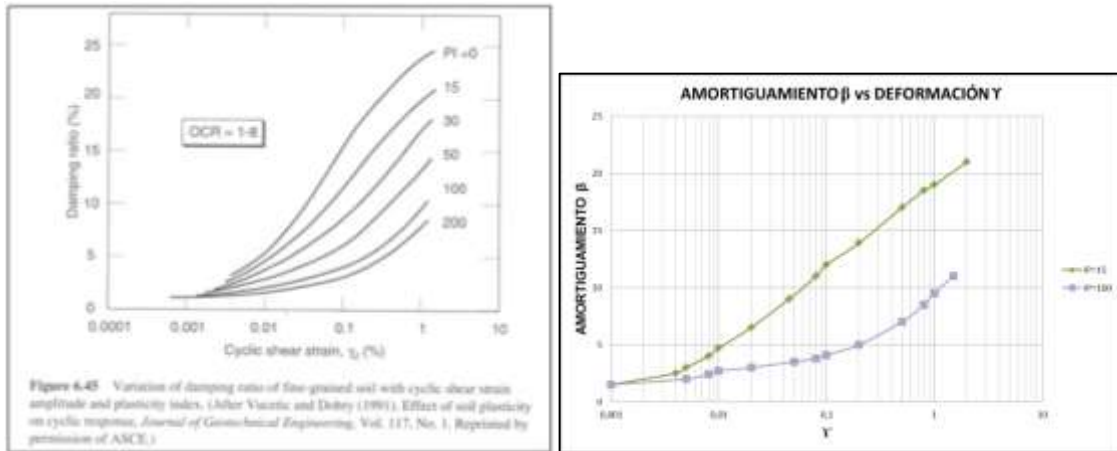
Estos autores proponen las curvas de reducción de módulo de corte normalizada y razón de amortiguamiento en función del índice de plasticidad las cuales se muestran en la Fig.9 y Fig.10, respectivamente.

Figura 8. Módulo de corte vs Deformación



Fuente: KRAMER, Steven. Variación del amortiguamiento del suelo de grano fino. Editorial Prentice Hall. 1996.

Figura 9. Amortiguamiento vs Deformación



Fuente: KRAMER, Steven. Variación del amortiguamiento del suelo de grano fino. Editorial Prentice Hall. 1996.

Para nuestro análisis se utilizarán las curvas con IP=15% - 100%, debido a que contamos con tres estratos de los cuales dos tienen Índice de Plasticidad similar (Estrato1 IP=22,9%; Estrato 3 IP= 17,56%) y uno con un índice de plasticidad mucho mayor (Estrato 2 IP= 107,17%).

#### 4.1.4.2 Curvas dinámicas propuestas por Roblee y Chiou

Con base en la tabulación propuesta por los autores Roblee y Chiou, la cual se encuentra en las diapositivas “Sísmica de los suelos” del Ingeniero Jaime Suarez se presentan las siguientes curvas dinámicas con su respectiva tabla de datos para materiales de alta y baja plasticidad a diferentes profundidades<sup>21</sup>.

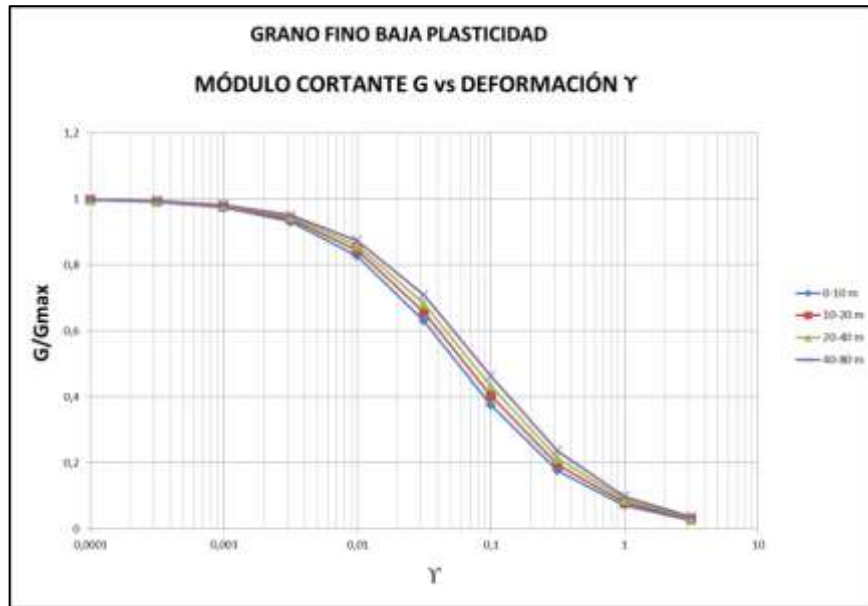
<sup>21</sup> SUAREZ, Op. Cit.

Tabulación de las curvas dinámicas propuestas por Roblee y Chiou

GRANO FINO BAJA PLASTICIDAD				GRANO FINO ALTA PLASTICIDAD					
PROF. (m)	$\gamma$	$\beta$	G/Gmax	PROF. (m)	$\gamma$	$\beta$	G/Gmax		
0	10	0,0001	1,32	0,997	0	10	0,0001	1,32	0,999
		0,000316	1,37	0,991			0,000316	1,35	0,996
		0,001	1,53	0,974			0,001	1,45	0,987
		0,00316	2,02	0,931			0,00316	1,78	0,962
		0,01	3,38	0,827			0,01	2,75	0,891
		0,0316	6,56	0,63			0,0316	5,3	0,725
		0,1	11,67	0,376			0,1	10,42	0,46
		0,316	16,72	0,176			0,316	17	0,216
		1	19,86	0,071			1	21,95	0,082
10	20	3,16	20,83	0,026	10	20	3,16	23,84	0,028
		0,0001	1,17	0,997			0,0001	1,16	0,999
		0,000316	1,22	0,992			0,000316	1,19	0,996
		0,001	1,35	0,977			0,001	1,29	0,989
		0,00316	1,78	0,938			0,00316	1,57	0,966
		0,01	3	0,844			0,01	2,43	0,903
		0,0316	5,94	0,657			0,0316	4,74	0,75
		0,1	10,89	0,404			0,1	9,55	0,493
		0,316	16,07	0,194			0,316	16,12	0,239
20	40	1	19,47	0,079	20	40	1	21,38	0,092
		3,16	20,66	0,029			3,16	23,61	0,032
		0,0001	1,04	0,997			0,0001	1,03	0,999
		0,000316	1,08	0,993			0,000316	1,06	0,997
		0,001	1,2	0,98			0,001	1,14	0,99
		0,00316	1,58	0,945			0,00316	1,39	0,97
		0,01	2,67	0,858			0,01	2,15	0,914
		0,0316	5,36	0,682			0,0316	4,22	0,774
		0,1	10,15	0,433			0,1	8,73	0,526
40	80	0,316	15,42	0,213	40	80	0,316	15,23	0,264
		1	19,07	0,088			1	20,79	0,104
		3,16	20,49	0,033			3,16	23,37	0,036
		0,0001	0,92	0,998			0,0001	0,91	0,999
		0,000316	0,95	0,994			0,000316	0,93	0,997
		0,001	1,06	0,982			0,001	1	0,991
		0,00316	1,39	0,951			0,00316	1,23	0,974
		0,01	2,35	0,873			0,01	1,9	0,923
		0,0316	4,8	0,709			0,0316	3,77	0,795
40	80	0,1	9,37	0,463	40	80	0,1	7,98	0,556
		0,316	14,72	0,235			0,316	14,38	0,289
		1	18,63	0,098			1	20,19	0,116
		3,16	20,31	0,037			3,16	23,11	0,041

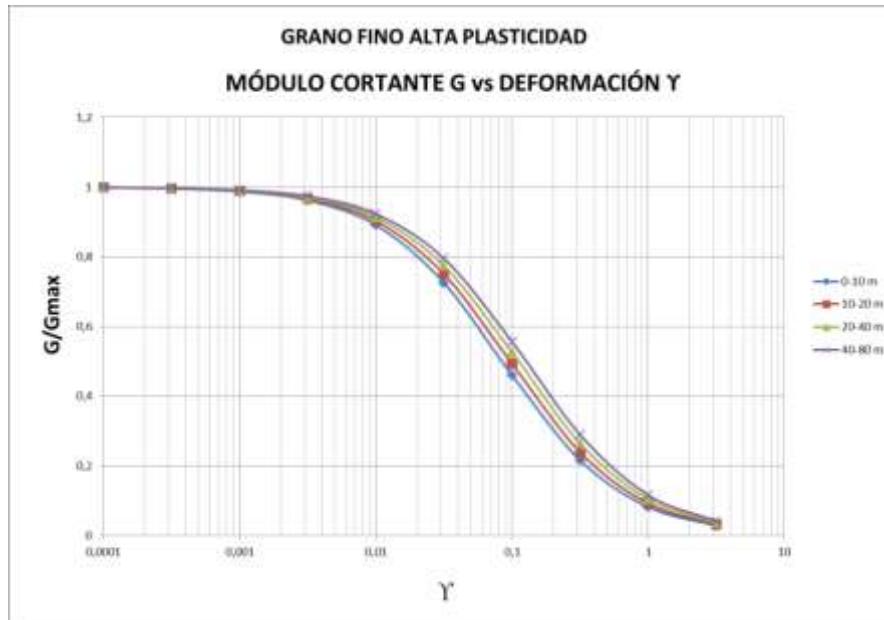
Fuente: SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

Figura 10. Gráfica G/Gmax vs Deformación – Grano fino de baja plasticidad



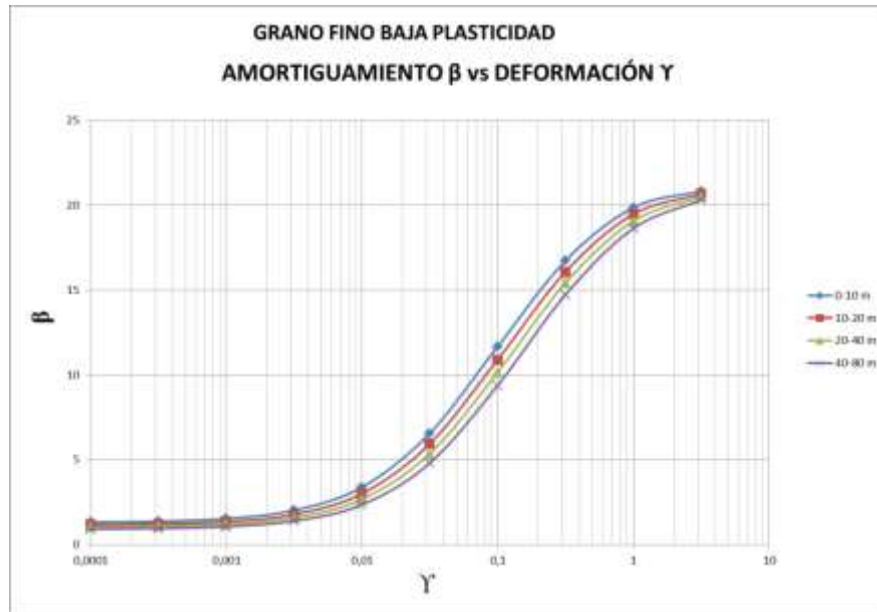
Fuente: SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

Figura 11. Gráfica G/Gmax vs Deformación – Grano fino de alta plasticidad



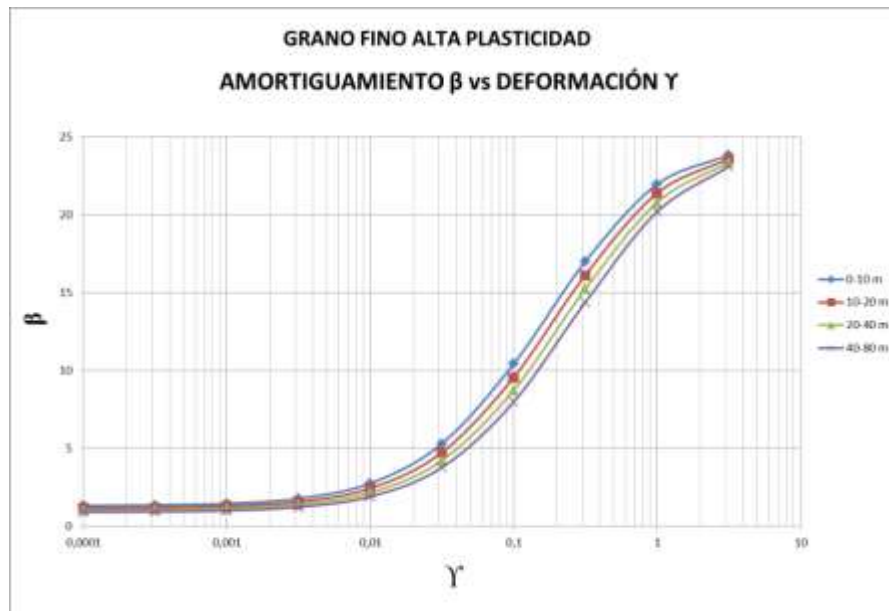
Fuente: SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

Figura 12. Gráfica Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación – Grano fino de baja plasticidad



Fuente: SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

Figura 13. Gráfica Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación – Grano fino de alta plasticidad



Fuente: SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].www.erosión.com.co. 88 diapositivas, color.

Las curvas dinámicas para grano fino de baja plasticidad son apropiadas para materiales donde predominan arenas (IP=0) con bajo contenido de arcilla (>15%) para que aporte plasticidad al material; a su vez las curvas dinámicas para grano fino de alta plasticidad son apropiadas para materiales donde predomina el contenido de arcilla, debido a que la plasticidad es directamente proporcional al contenido de arcilla en el material.<sup>22</sup>

Figura 14. Modelos de comportamiento y análisis de respuesta de suelos

Deformación cortante	10E-6	10E-5	10E-4	10E-3	10E-2	10E-1
	Def. pequeñas	Def. intermedias		Def. grandes	Falla	
Elástico						
Elásto-plástico						
Falla						
Efecto de carga repetida						
Velocidad de aplicación						
<b>Modelo</b>	<b>Elástico Lineal</b>		<b>Visco Elástico</b>		<b>Elástico Plástico</b>	
Método de respuesta	Lineal		Lineal Equivalente		Integración paso a paso	

Fuente: GONZÁLEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005. p. 44.

#### 4.1.4.3 Modelo tipo Masing

Según la Ingeniera Claudia González<sup>23</sup>, el modelo tipo Masing, fue propuesto por Romo en 1995, para modelar las relaciones no lineales del módulo de corte G y la relación de amortiguamiento  $\beta$ , respecto a la deformación  $\gamma$ .

Este modelo se basa en las siguientes hipótesis:

<sup>22</sup> SUAREZ, Op. Cit.

<sup>23</sup> GONZÁLEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005. p. 47.

- El material sometido a carga armónica con amplitud constante responde de manera estable, si el amortiguamiento histerético es suficiente para atenuar en pocos ciclos la parte transitoria.
- La no linealidad del material es de naturaleza plástica, es decir, la rigidez del suelo regresa a su valor máximo cada vez que la carga cambia de sentido.
- El amortiguamiento es de tipo histerético.

El modelo propone las siguientes ecuaciones:

$$G = [G_{\min} - G_{\max}] \cdot H(\gamma) + G_{\max} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$\beta = [\beta_{\max} - \beta_{\min}] \cdot H(\gamma) + \beta_{\min} \quad \text{(Ecuación 10)}$$

$$H(\gamma) = \left[ \frac{\left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{2B}}{1 + \left( \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{2B}} \right]^A \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde  $\gamma_r$  corresponde a una deformación de referencia y A y B son parámetros del suelo.

Las condiciones de frontera establecidas, son:

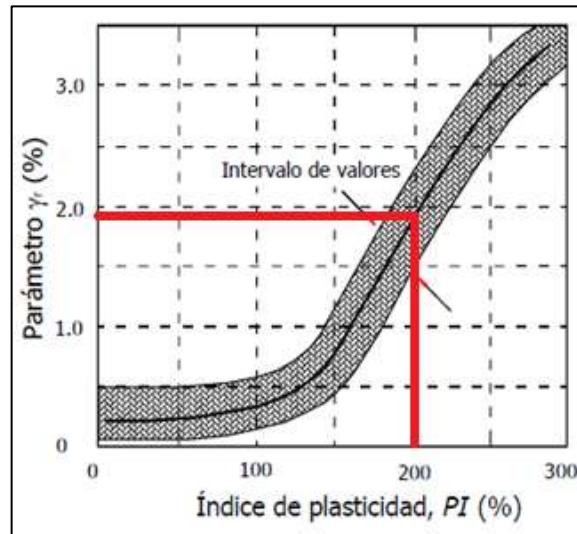
- Para deformaciones  $\gamma$  que tienden a infinito;  $H(\gamma)$  tiende a uno y el valor del módulo G tiende a  $G_{\min}$ .
- Para deformaciones  $\gamma$  que tienden a cero;  $H(\gamma)$  tiende a cero y el valor del módulo G tiende a  $G_{\max}$ .
- Para deformaciones  $\gamma$  tendientes a cero;  $H(\gamma)$  tiende a cero y el valor de la relación  $\beta$  tiende a  $\beta_{\min}$ .
- Para deformaciones  $\gamma$  tendientes a infinito;  $H(\gamma)$  tiende a uno y el valor de la relación  $\lambda$  tiende a  $\beta_{\max}$ .

El valor de  $G_{\max}$  es determinado como el valor máximo obtenido para deformaciones  $\gamma < 10^{-4} \%$ .

Mientras que el valor del módulo de rigidez al esfuerzo cortante mínimo,  $G_{\min}$ , es definido como el valor mínimo obtenido para deformaciones  $\gamma > 10^{-2} \%$ .

Los valores de A y B, definen la geometría de la curva de degradación de G. Estos parámetros dependen del índice de plasticidad del suelo estudiado.

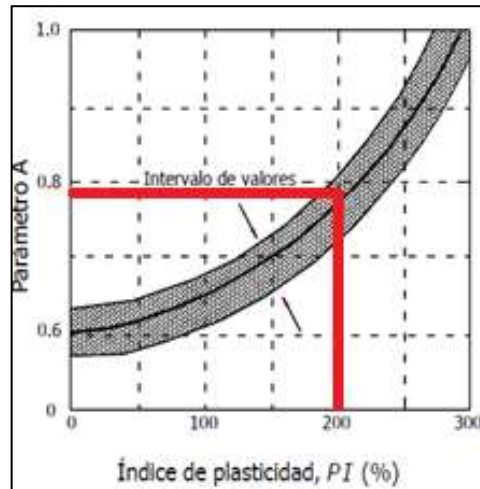
Figura 15. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro  $\gamma_r$



Fuente: GONZÁLEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005. p. 48.

Para determinar el parámetro  $\gamma_r$  únicamente se necesita el valor del índice de plasticidad para entrar por el eje X (IP%) y donde corte con la curva promedio encuentras en el eje Y el valor correspondiente para este índice de plasticidad.

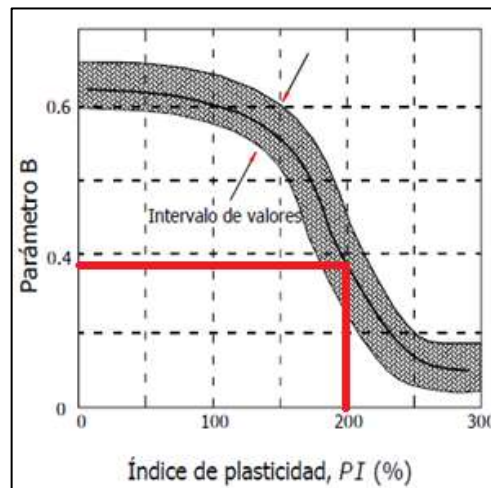
Figura 16. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro A.



Fuente: GONZÁLEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005. p. 49.

Para determinar el parámetro A únicamente se necesita el valor del índice de plasticidad para entrar por el eje X (IP%) y donde corte con la curva promedio encuentras en el eje Y el valor correspondiente para este índice de plasticidad.

Figura 17. Efecto del índice de Plasticidad en el parámetro B



Fuente: GONZÁLEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005. p. 49

Para determinar el parámetro B únicamente se necesita el valor del índice de plasticidad para entrar por el eje X (IP%) y donde corte con la curva promedio encuentras en el eje Y el valor correspondiente para este índice de plasticidad.

El modelo tipo Masing tiene como limitante que depende principalmente del índice de plasticidad, parámetro que para material granular (arenas) es igual a cero, y para que este índice de plasticidad aumente debe contener más del 12% de arcilla; por lo tanto este modelo no es el adecuado para trabajar con materiales granulares (arenas).

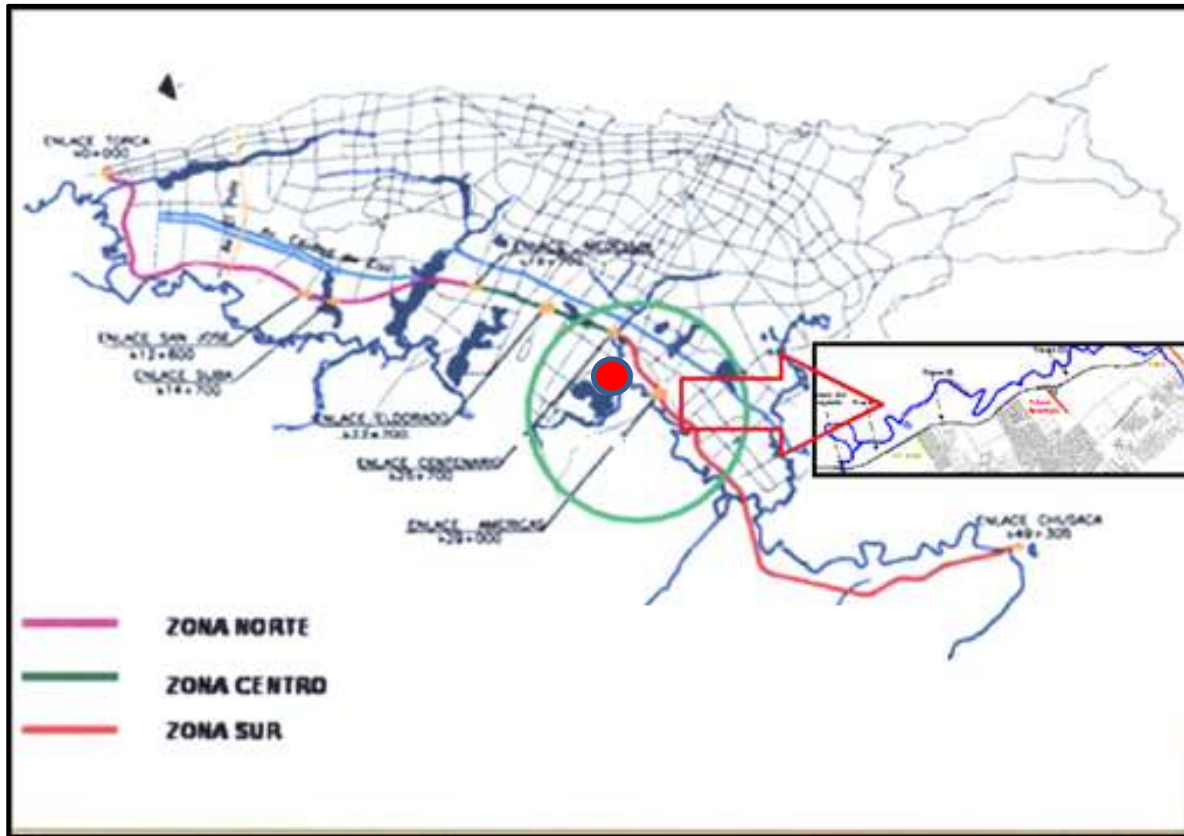
La plasticidad es una propiedad característica de las arcillas, depende del contenido de humedad y el ensayo para obtener el índice de plasticidad en laboratorio es básico y de bajo costo.

De acuerdo con lo anterior el modelo tipo Masing es el adecuado para trabajar arcillas o materiales con alto contenido de arcilla; para este proyecto aplica perfectamente ya que los suelos de la zona de estudio se componen principalmente por arcillas de alta plasticidad.

## **4.2 MARCO GEOGRÁFICO**

La zona de estudio se encuentra, ubicada al suroccidente de Bogotá D.C., dentro de la Localidad de Kennedy, en la intersección donde se planea construir la Avenida Longitudinal de Occidente (ALO) por Avenida Américas.

Figura 18. Localización General del proyecto



**Zona de estudio**

Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

El proyecto se divide, para efectos de estudio en tres tramos a saber:

- Tramo 1, de 1,8 km. De longitud, entre el río Bogotá y la avenida Bosa.
- **Tramo 2, de 4,7 Km. De longitud, entre la avenida Bosa y la avenida Américas.**
- Tramo 3, de 3,4 Km. De longitud, entre la avenida Américas y la Calle 13 (avenida Centenario).

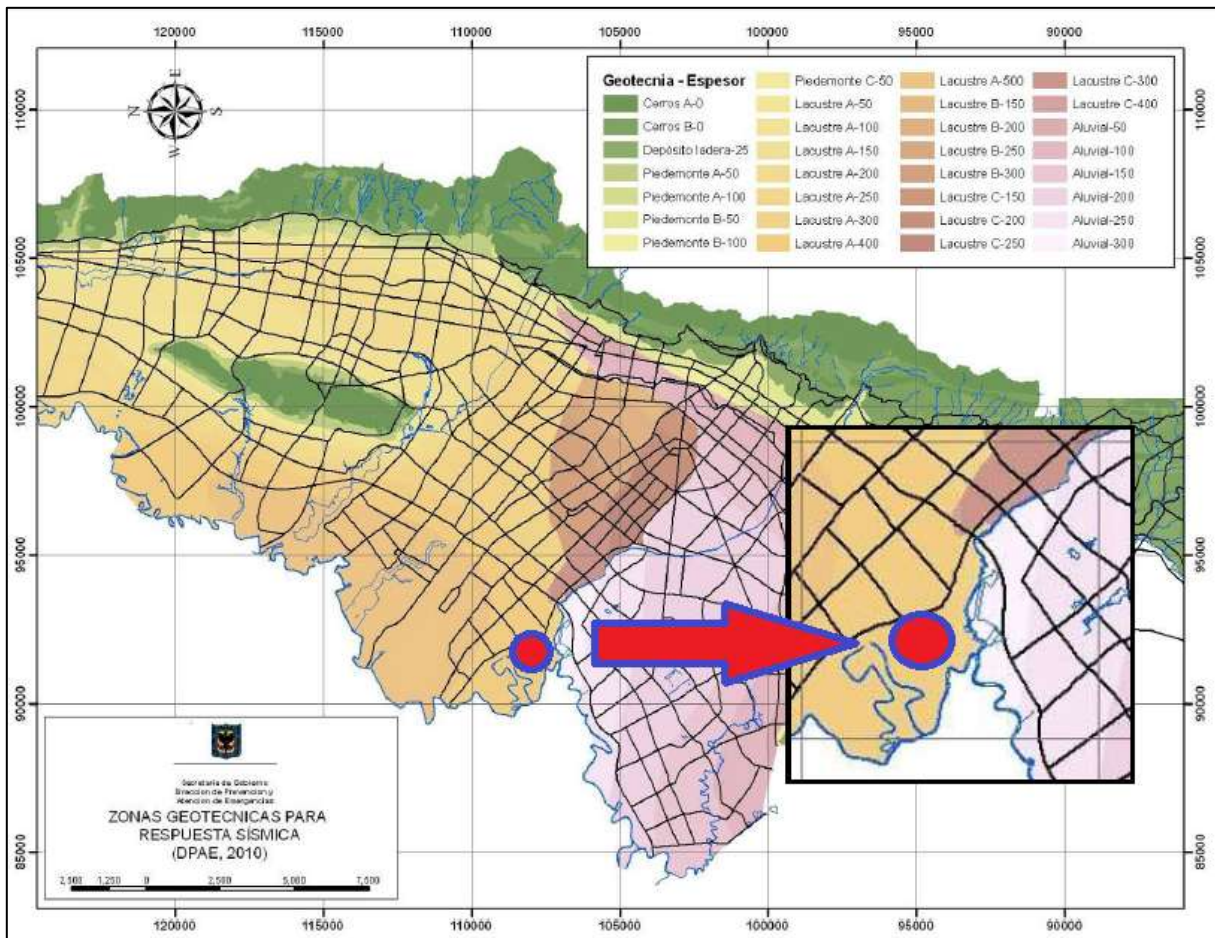
El Tramo 2 incluye la intersección con la avenida Américas, la cual a futuro, se proyecta construir una glorieta a nivel y un puente vehicular con una luz de 25m. Y una carga por estribo del orden de 750 Ton. Como estructura principal y a su vez un pontón peatonal sobre el canal Américas como estructura complementaria.

### 4.3 MARCO LEGAL

#### 4.3.1 Microzonificación sísmica de Bogotá

Tomando como referencia la Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones de la Alcaldía de Bogotá, se presentan los mapas de zonificación geotécnica para respuesta sísmica y zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá, con sus respectivas descripciones técnicas.

Figura 19. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica



Fuente: ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones. Bogotá. 2010. p.59.



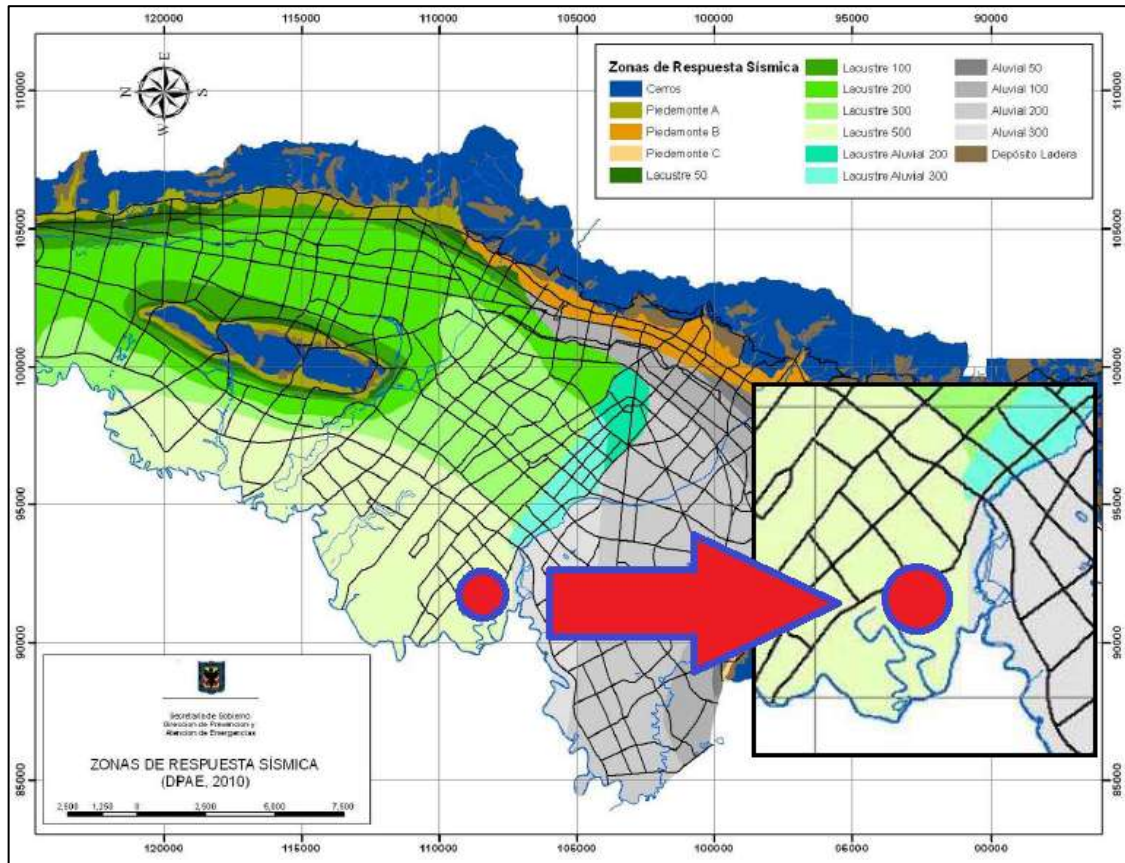
**Zona de estudio pertenece a la zona Lacustre A-300 que corresponde a un depósito muy blando con espesores entre 300 – 400m, geología compuesta por terrazas altas – lacustres con geomorfología de tipo planicie.**

Tabla 5. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica.

Nombre	Geotecnia	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Geología	Geomorfología
Cerros A	Rocas	< 6	< 0.3	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta y moderada pendiente
Cerros B				Formaciones de Arcillolita	
Depósito ladera	Suelos de ladera	< 25	< 0.4	Depósitos de ladera	
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	< 50	0.3-0.4	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte
		50-100	0.4-0.6		
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro	< 50	0.3-0.4		
		50-100	0.4-0.6		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur	< 50	0.3-0.6		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	< 50	1.0-1.5	Terraza Alta - Lacustre	Planicie
		50-100	1.5-2.5		
		100-150	2.5-3.0		
		150-200	3.0-3.5		
		200-250	3.5-4.0		
		250-300	4.0-4.5		
		300-400	4.5-5.5		
Lacustre B	Suelo lacustre blando	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
		300-400	4.3-5.3		
Aluvial	Suelo aluvial arenoso y fino	< 50	0.4-0.8	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	
		50-100	0.8-1.2		
		100-150	1.2-1.8		
		150-200	1.8-2.5		
		200-250	2.5-3.2		
	250-300	3.2-4.0			

Fuente: ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones. Bogotá. 2010. p.60.

Figura 20. Mapa de zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Bogotá



Fuente: ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones. Bogotá. 2010. p.118.



**Zona de estudio pertenece a la zona Lacustre 500 que corresponde a un depósito blando compuesto por arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba con espesores entre 300 - 500m, velocidad de onda promedio <math><175\text{m/s}</math> y humedad natural promedio de 40%.**

Tabla 6. Descripción de las zonas de respuesta sísmica.

Zona	Espesor del depósito (m)	Período fundamental del suelo (s)	Descripción Geotécnica General	Velocidad onda promedio 50 m Vs (m/s)	Humedad Promedio 50 m Hn (%)	Efectos de sitio relacionados
Cerro	-	< 0.3	Rocas sedimentarias y depósitos de ladera con espesores inferiores a 6 m	> 750	< 10	Topográfico
Piedemonte A	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con intercalaciones de arcillas blandas. Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o arena arcillosa, capas de arcillas blandas.	200 - 750	Oct-80	Topográfico, amplificación
Piedemonte B	< 50	0.3-0.6	Suelo coluvial y aluvial con espesor superior a 12 m. Bloques, cantos y gravas con matriz arcillo arenosas o arena arcillosa	300 - 750	Oct-30	Topográfico, amplificación
Piedemonte C	< 50	0.3-0.6				
Lacustre-50	< 50	1.0-1.5	Suelo lacustre blando: Arcillas limosas o limos arcillosos, en algunos sectores con intercalaciones de lentes de turba	< 175	> 80	Amplificación
Lacustre-100	50-100	1.5-2.5				Amplificación
Lacustre-200	100-200	2.5-3.5				Amplificación
Lacustre-300	200-300	3.5-4.5				Amplificación
Lacustre-500	300-500	4.5-6.5				Amplificación
Lacustre Aluvial-200	100-200	2.0-3.0	Suelo lacustre con intercalaciones de aluvial. Arcillas limosas o limos arcillosos con de lentes de turba y capas de arenas compactas	< 200	> 60	Amplificación
Lacustre Aluvial-300	200-300	3.0-4.0				Amplificación
Aluvial-50	< 50	0.4-0.8	Suelo aluvial duro: Arcillas limosas o arenas arcillosos o limos arenosos, en algunos sectores se encuentran lentes de arenas limpias	175 - 300	25 - 50	Amplificación, licuación
Aluvial-100	50-100	0.8-1.2				Amplificación, licuación
Aluvial-200	100-200	1.2-2.5				Amplificación, licuación
Aluvial-300	200-300	2.5-4.0				Amplificación, licuación
Depósito Ladera	Jun-25	< 0.3	Depósitos de ladera con espesores superiores a 6 m de composición variable.	Variable según el tipo de depósito	Variable según el tipo de depósito	Topográfico

Fuente: ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones. Bogotá. 2010. p.117.

#### 4.3.2 NSR 10 – Título H

Para realizar la evaluación geotécnica de efectos sísmicos que deben ser considerados en el diseño de estructuras se parte de los aspectos básicos que están relacionados con la modificación del movimiento del terreno (efectos inerciales) y los cinemáticos. Adicionalmente, los aspectos básicos contribuyen a cuantificar de una manera acertada las incertidumbres relacionadas con la respuesta dinámica del terreno, las condiciones de estabilidad de los materiales, y los efectos del potencial de licuación o movilidad cíclica en los suelos granulares y en suelos de grano fino de baja plasticidad.<sup>24</sup>

El reglamento colombiano sismo resistente NSR-10, en el título H, capítulo H-7, numeral H.7.1, sugiere que:

<sup>24</sup> ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. NSR-10 Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá. Colombia. 2010. Título H.

### Efecto de la litología y tipos de suelos

- La caracterización básica del perfil litológico se establece en términos de los valores de velocidad de onda de corte (**Vs**) con la profundidad y su variación horizontal, hasta el nivel de roca (rechazo en el ensayo SPT), o suelos duros (**Vs = 500 m/s**) mediante ensayos geofísicos en el terreno. Adicionalmente, de manera complementaria para efectos de caracterización de la variación espacial, o para evaluar los rangos de valores de las propiedades relevantes, se pueden utilizar correlaciones debidamente soportadas con otros parámetros geotécnicos. Estas correlaciones no pueden reemplazar las mediciones directas en el terreno.
- Para los diferentes materiales presentes en el perfil se debe determinar la variación de la rigidez (**G**) y del amortiguamiento (**β**) con el nivel de deformaciones y de esfuerzos (degradación de propiedades dinámicas). La determinación de la variación de la rigidez dinámica se puede hacer mediante ensayos dinámicos de laboratorio siempre y cuando se cuente con muestras representativas de alta calidad. En este caso los ensayos deben cubrir el rango de interés de deformaciones y esfuerzos, en función del número de ciclos de carga, para el problema que se esté estudiando, y se deben normalizar adecuadamente para poder relacionarlos con los valores de rigidez en el terreno, preferiblemente mediante la determinación en el laboratorio, sobre las mismas muestras, de la velocidad de onda de corte a bajas deformaciones. Se debe justificar adecuadamente la normalización que se haga de la variación de la rigidez dinámica con la deformación.
- La variación de la rigidez y el amortiguamiento con la deformación también se debe estimar con base en referencias debidamente sustentadas de correlaciones o modelos reportados en la literatura técnica internacional. Estos resultados se deben comparar con los obtenidos de los ensayos dinámicos de laboratorio.
- Se debe dar consideración explícita a la verificación de la resistencia dinámica de cada material, incluyendo cuando sea aplicable, la evaluación del potencial de licuación de los suelos granulares y suelos de grano fino de baja plasticidad, y la degradación progresiva de la resistencia dinámica de los suelos finos con el número de ciclos de carga equivalente. También deben calcularse los asentamientos producidos por el sismo (deformación volumétrica por densificación), empleando criterios o metodologías actualizadas y reconocidas internacionalmente.<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. NSR-10 Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá. Colombia. 2010. Título H.

## 5 DISEÑO METODOLÓGICO

### 5.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, por lo que se realizará un detallado reconocimiento y evaluación de las variables físicas que determinan el comportamiento dinámico de los suelos que conforman la zona de estudio, con el propósito de determinar los parámetros sísmicos que se deben utilizar en posteriores estudios y diseños de obras de ingeniería que se planeen construir en la Avenida Longitudinal de Occidente con Avenida Américas.

### 5.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo correlacional, ya que se procede a recopilar y analizar los datos obtenidos en pruebas de campo y ensayos de laboratorio realizados a los suelos de la zona de estudio, y por medio de los diferentes procedimientos y correlaciones ya establecidas por la ingeniería geotécnica, obtener los parámetros sísmicos y posteriormente interpretar estos resultados.

### 5.3 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

#### 5.3.1 Fase 1. Seleccionar la información de pruebas de campo y ensayos de laboratorio realizados a los suelos de la zona de estudio.

Esta fase de la investigación consiste en revisar la información recuperada del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), con el fin de recopilar y seleccionar los resultados de pruebas de campo y ensayos de laboratorio realizados (propiedades índice, Down Hole, velocidad de onda, triaxial cíclico) en la zona de estudio por la firma C.E.I. S.A, que permitan realizar una caracterización geotécnica a los suelos del lugar.

### **5.3.2 Fase 2. Caracterizar estática y dinámicamente los suelos de la zona de estudio.**

Esta fase de la investigación consiste en interpretar y correlacionar, los resultados seleccionados de las pruebas de campo y ensayos de laboratorio seleccionados en la fase anterior realizados por la firma C.E.I S.A., para obtener los parámetros estáticos y dinámicos de los suelos de la zona de estudio, y así poder establecer el perfil geotécnico del lugar.

### **5.3.3 Fase 3. Elaborar las curvas dinámicas de los suelos de la zona de estudio, aplicando el modelo tipo Masing.**

A partir de los resultados de los parámetros estáticos y dinámicos del suelo establecidos en la fase anterior, y de los resultados de los ensayos de down hole, velocidad de onda, y triaxial cíclico, se obtienen las curvas dinámicas normalizadas de la zona de estudio aplicando el modelo tipo Masing, el cual se fundamenta en obtener los parámetros A, B y  $\gamma_r$  en función del índice de plasticidad del material (como se expone en el marco de referencia de la presente investigación) y de esta forma poder analizar la variación de la rigidez y amortiguamiento que presenta el material.

### **5.3.4 Fase 4. Comparar las curvas dinámicas de los suelos de la zona de estudio, con las propuestas por Vucetic y Dobry (1991), las presentadas en la microzonificación sísmica Bogotá (2010), las de la Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis en la Ciudad de Bogotá y las de un depósito de arcillas de la Ciudad de México.**

En primera instancia, se obtienen las curvas dinámicas aplicando el modelo tipo Masing, de los suelos de la Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis en la ciudad de Bogotá, a partir de los ensayos de campo y laboratorio recuperados del Instituto de Desarrollo Urbano IDU.

En segunda instancia se extractan las curvas dinámicas correspondientes a unas muestras de arcilla de la Ciudad de México, obtenidas por la Ingeniera Claudia Gonzales y publicadas en la Revista de Ingeniería Sísmica No. 84 1-23 (2011), con esta información se realiza la comparación de las curvas obtenidas para las tres zonas mencionadas analizando la resistencia al corte y la capacidad de disipación de energía que presentan los materiales de cada zona.

## **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 INFORMACIÓN DE PRUEBAS DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LOS SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO**

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados en el sitio de estudio por la firma C.E.I. S.A, para el proyecto de revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13, contratado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en el año 2007.

En primera instancia, se presentan los resultados de los ensayos (ANEXO 1.) que definen las propiedades estáticas de los materiales presentes en la zona de estudio, como son:

- Límites de consistencia
- Resistencia a la compresión inconfiada
- Determinación del peso unitario
- Determinación del contenido de humedad
- Expansión controlada en consolidómetro
- Consolidación unidimensional

En segunda instancia, se presentan los resultados de los ensayos (ANEXO 2.) que definen las propiedades dinámicas:

- Triaxial Cíclico con deformación controlada
- Ensayo de Velocidad de Onda
- Down Hole

#### **6.1.1 Resultados de ensayos para caracterización estática**

A partir de estos resultados se definen 6 estratos, los cuales se pueden identificar en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados de ensayos para caracterización estática (ANEXO3.)

Muestra No.	Profundidad (m)		Clasif. USCS	Descripción	HUMED. NATURAL		LIMIT, ATTERBERG			TRIAJAL CICLICO					Cu (T/m2)	COMPR. INCONF. qu (T/m²)				
	Desde	Hasta			Wn1 (%)	Wn2 (%)	LL	LP	IP	Gs	e	n (%)	Sr (%)	Y <sub>d</sub> (T/m³)			Y <sub>T</sub> (T/m³)			
	0	1	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.	37,80	43,10									1,34	1,84	2,08			
1	1	2																		
2	2	3																		
3	3	4					29,40	30,20	70,40	27,30	43,10					1,47		1,91		
5	4	5	CL	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras.	24,07	24,16	29,40	13,61	15,79	2,74	0,63	38,83	100,00	1,58	1,94			2,60		
6-7	5	6					17,10	25,70	15,90	9,80										
8	6	7																		
9	7	8	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas.	23,50													2,10		
9	8	9					27,60								1,51	1,92				
9	9	10																		
	10	11																		
	11	12																		
14	12	13	CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.	111,50	110,70	174,50	54,90	119,60						0,64	1,36	1,60	3,20		
15	13	14					105,65	106,50	160,60	41,91	118,69	2,33	2,63	72,43	100,00	0,66		1,41		
	14	15																		
	15	16																		
	16	17																		
	17	18																		
	18	19																		
	19	20																		
18	20	21					155,90									0,53		1,35		2,90
	21	22																		
	22	23					107,44	110,71	177,10	43,43	133,67	2,45	2,74	73,27	100,00	0,64		1,36		
	23	24																		
	24	25					109,40									0,66		1,39		
	25	26																		
	26	27																		
	27	28																		
	28	29																		
	29	30																		
	30	31																		
	31	32			110,00		102,30	121,60	35,30	86,30				0,66	1,39	3,00	6,00			
	32	33																		
	33	34			135,80									0,56	1,31					
	34	35																		
	35	36			123,94	124,77	179,90	41,39	138,51	2,20	2,79	73,63	100,00	0,54	1,21					
	36	37																		
	37	38			81,90	99,00	110,20	36,10	74,10					0,76	1,38		9,30			
	38	39																		
	39	40			30,70									1,38	1,80		2,50			
	40	41	CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad media a baja, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas,													2,60			
	41	42																		
	42	43					27,60	27,60	34,40	23,80	10,60	2,70		96,20	1,48	1,89			5,20	
	43	44	CL - ML	Arcillas limosas inorgánicas de baja plasticidad, arcillas con grava, arcillas con arenas muy finas.												2,80				
	44	45					34,91	35,24	40,40	25,93	14,47	2,74	0,98	49,57	100,00		1,35	1,84		
	45	46																		
	46	47					50,60										1,12	1,68		5,50
	47	48																		
	48	49					37,91	37,05	56,40	28,79	27,61						1,27	1,81		
	49	50			92,70									0,76	1,47		9,80			

Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006.

De acuerdo con la tabla 7. se tiene un perfil donde predominan las arcillas de media a alta plasticidad con un grado de saturación del 100%, el estrato (CH) de los 12m. – 38m. De profundidad presenta los mayores valores para el índice de plasticidad (IP>100%) y la humedad natural (Wn>100%); a su vez los menores valores de gravedad específica (Gs), peso unitario total (Y<sub>T</sub>) y peso unitario seco (Y<sub>d</sub>), lo anterior con respecto a los demás estratos.

De acuerdo a los resultados de los ensayos de CEI S.A., se encuentra el nivel freático a los 5.9 metros de profundidad.

Cabe resaltar que la estratificación propuesta en el anterior perfil no fue tomada en cuenta, para nuestro análisis se estratificó teniendo en cuenta el índice de plasticidad, el peso unitario total, la humedad natural y la velocidad de onda cortante Vs.

## 6.1.2 Resultados de ensayos para caracterización dinámica

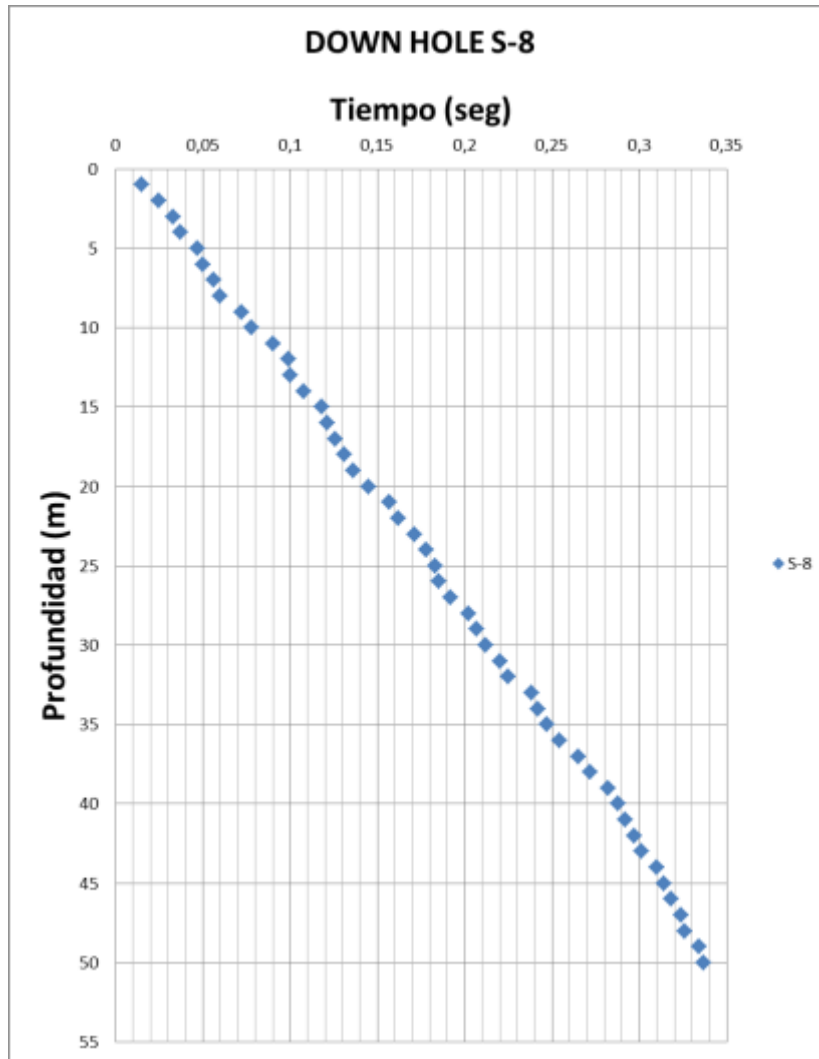
### 6.1.2.1 Down Hole (ANEXO 2.)

Tabla 8. Resultados ensayo Down Hole

Prof. (m)	Tiempo (seg)	X (m)	R (m)
1	0,015	2	2,236
2	0,025	2	2,828
3	0,033	2	3,606
4	0,037	2	4,472
5	0,047	2	5,385
6	0,05	2	6,325
7	0,056	2	7,280
8	0,06	2	8,246
9	0,072	2	9,220
10	0,078	2	10,198
11	0,09	2	11,180
12	0,099	2	12,166
13	0,1	2	13,153
14	0,108	2	14,142
15	0,118	2	15,133
16	0,121	2	16,125
17	0,126	2	17,117
18	0,131	2	18,111
19	0,136	2	19,105
20	0,145	2	20,100
21	0,157	2	21,095
22	0,162	2	22,091
23	0,171	2	23,087
24	0,178	2	24,083
25	0,183	2	25,080
26	0,185	2	26,077
27	0,192	2	27,074
28	0,202	2	28,071
29	0,207	2	29,069
30	0,212	2	30,067
31	0,22	2	31,064
32	0,225	2	32,062
33	0,238	2	33,061
34	0,242	2	34,059
35	0,247	2	35,057
36	0,254	2	36,056
37	0,265	2	37,054
38	0,272	2	38,053
39	0,282	2	39,051
40	0,288	2	40,050
41	0,292	2	41,049
42	0,297	2	42,048
43	0,301	2	43,046
44	0,31	2	44,045
45	0,314	2	45,044
46	0,318	2	46,043
47	0,324	2	47,043
48	0,326	2	48,042
49	0,334	2	49,041
50	0,337	2	50,040

Fuente: Autoría propia

Figura 21. Gráfica Tiempo vs Profundidad (Down hole)



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006.

#### 6.1.2.2 Ensayo de penetración estándar (SPT) (ANEXO 3.)

Si bien el ensayo de penetración estándar (SPT) no aporta parámetros dinámicos directamente, utilizando las correlaciones propuestas por diferentes autores en función del número de golpes (N) y expuestas en el marco de referencia de la presente investigación se calculó la velocidad de onda de corte  $V_s$ , sin embargo para efectos de este análisis estas velocidades de onda cortante no fueron tenidas en cuenta ya que difieren de los valores

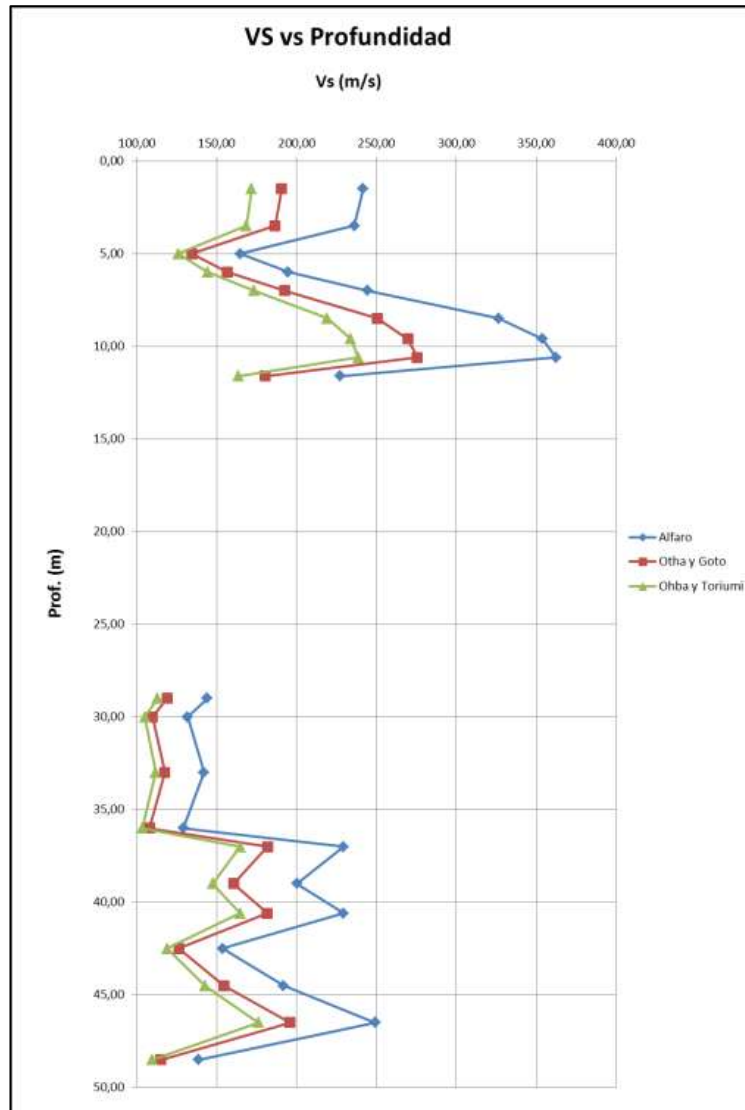
obtenidos a partir de los resultados del ensayo de Down-Hole y de la microzonificación sísmica de Bogotá (2010).

Tabla 9. Resultados ensayo SPT

Profundidad (m)	N campo	Vs (m/s)Alfaro	Vs (m/s)Otha y Goto	Vs (m/s)Ohba y Toriumi
1,50	9	241,691	190,655	171,891
3,50	11	236,141	186,672	168,690
5,00	5	164,791	134,623	126,075
6,00	8	194,707	156,656	144,300
7,00	15	244,608	192,744	173,569
8,50	33	326,442	250,532	219,239
9,60	42	353,912	269,615	234,055
10,60	46	362,387	275,476	238,582
11,60	14	227,301	180,311	163,559
<b>NO EXISTEN DATOS DE SPT</b>				
29,00	5	144,090	119,165	113,095
30,00	4	131,881	109,954	105,274
33,00	5	142,202	117,745	111,893
36,00	4	129,390	108,065	103,661
37,00	18	229,509	181,902	164,844
39,00	13	200,262	160,712	147,624
40,60	19	229,384	181,812	164,772
42,50	7	153,717	126,377	119,173
44,50	13	191,997	154,674	142,673
46,50	10	249,236	196,055	176,222
48,50	6	138,734	115,133	109,680

Fuente: Autoría propia

Figura 22. Grafica Velocidad de onda cortante Vs – Profundidad (SPT)



Fuente: Autoría Propia

### 6.1.2.3 *Triaxial cíclico con deformación controlada*

La firma CEI S.A., realizó cinco ensayos triaxiales para diferentes profundidades en el sitio de estudio, los resultados se muestran a continuación:

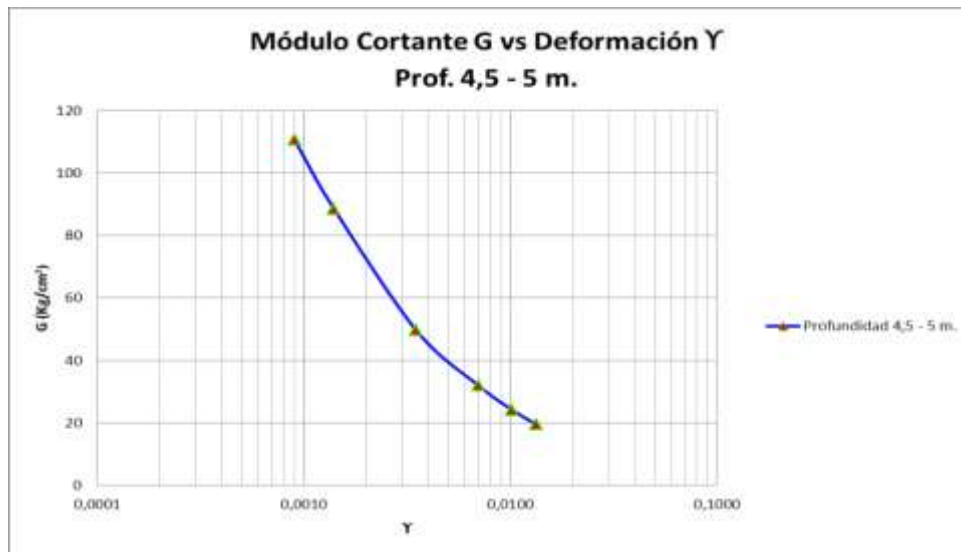
#### 6.1.2.3.1 Profundidad 4.5 – 5 m

Tabla 10. Resultados ensayo triaxial para 4.5 – 5 m de profundidad

Ciclo	$\gamma$	$\beta$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	0,0133	0,148	19,4
12	0,0102	0,145	24,1
11	0,0070	0,137	31,9
10	0,0035	0,127	49,6
9	0,0014	0,112	88,5
8	0,0009	0,108	110,7

Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006.

Figura 23. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 4.5 - 5 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006.

Figura 24. Gráfica de Amortiguamiento  $\beta$  Vs Deformación  $\gamma$  para 4.5 - 5 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006.

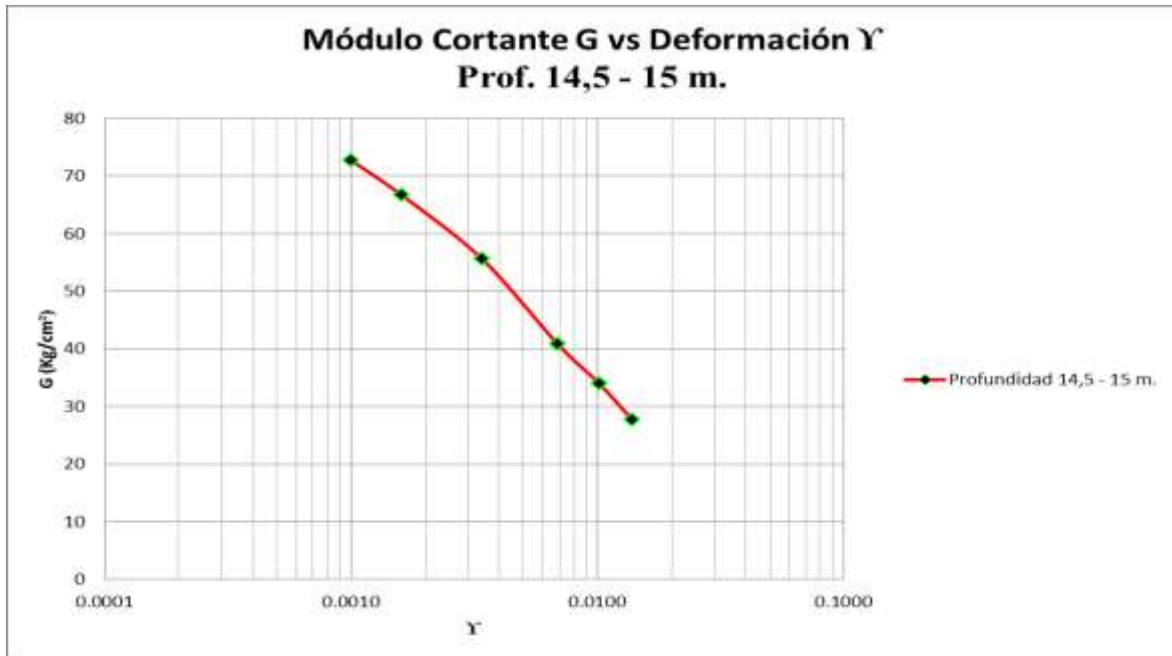
#### 6.1.2.3.2 Profundidad 14.5 – 15 m

Tabla 11. Resultados ensayo triaxial para 14.5 – 15 m de profundidad

Ciclo	$\gamma$	$\beta$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	0,0138	0,152	27,7
12	0,0102	0,135	33,9
11	0,0069	0,135	40,8
10	0,0034	0,12	55,6
9	0,0016	0,113	66,7
8	0,0010	0,112	72,7

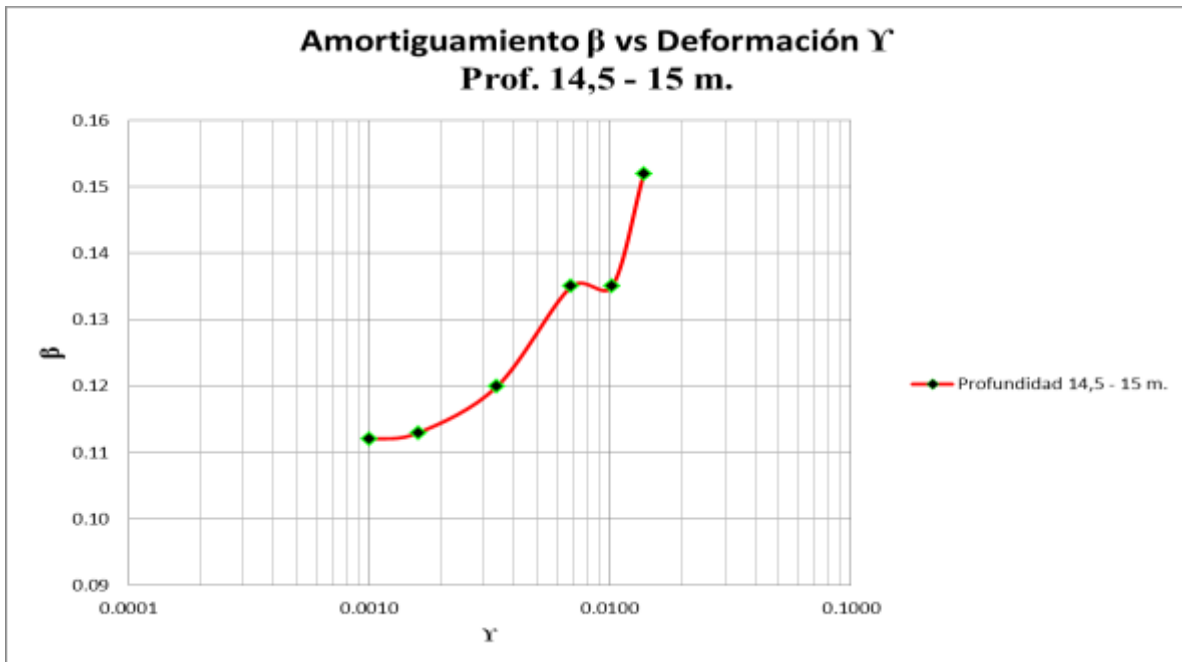
Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 25. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 14.5 - 15 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 26. Gráfica de Amortiguamiento  $\beta$  Vs Deformación  $\gamma$  para 14.5 - 15 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

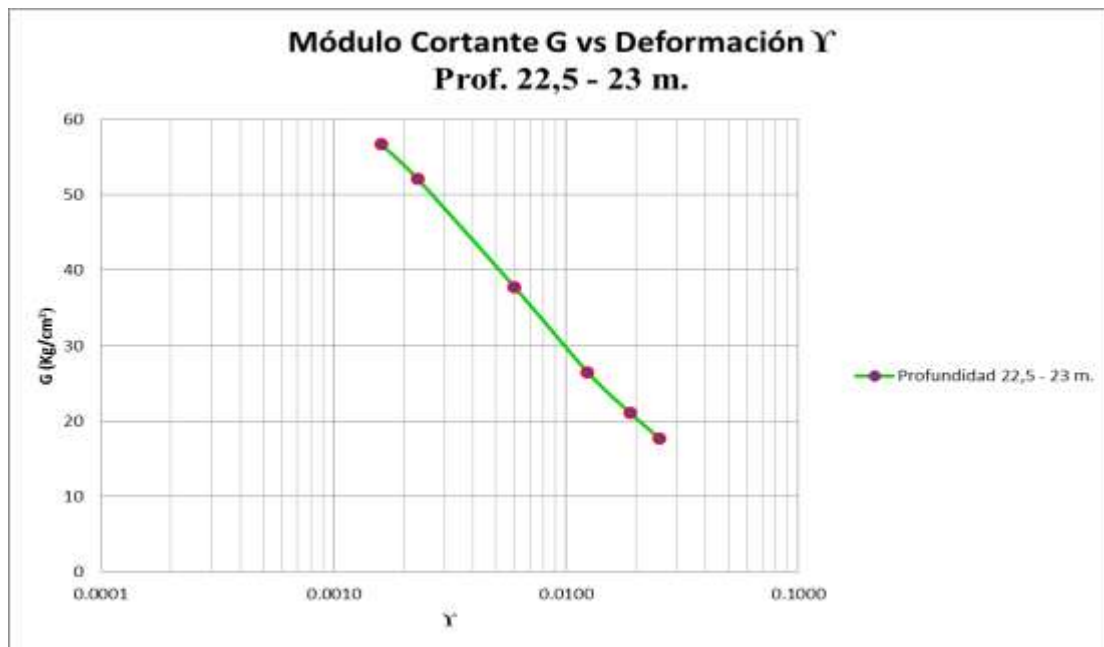
6.1.2.3.3 Profundidad 22.5 – 23 m

Tabla 12. Resultados ensayo triaxial para 22.5 – 23 m de profundidad

Ciclo	$\gamma$	$\beta$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	0.0253	0.174	17.7
12	0.0189	0.176	21.1
11	0.0124	0.163	26.5
10	0.0060	0.15	37.8
9	0.0023	0.137	52.1
8	0.0016	0.126	56.7

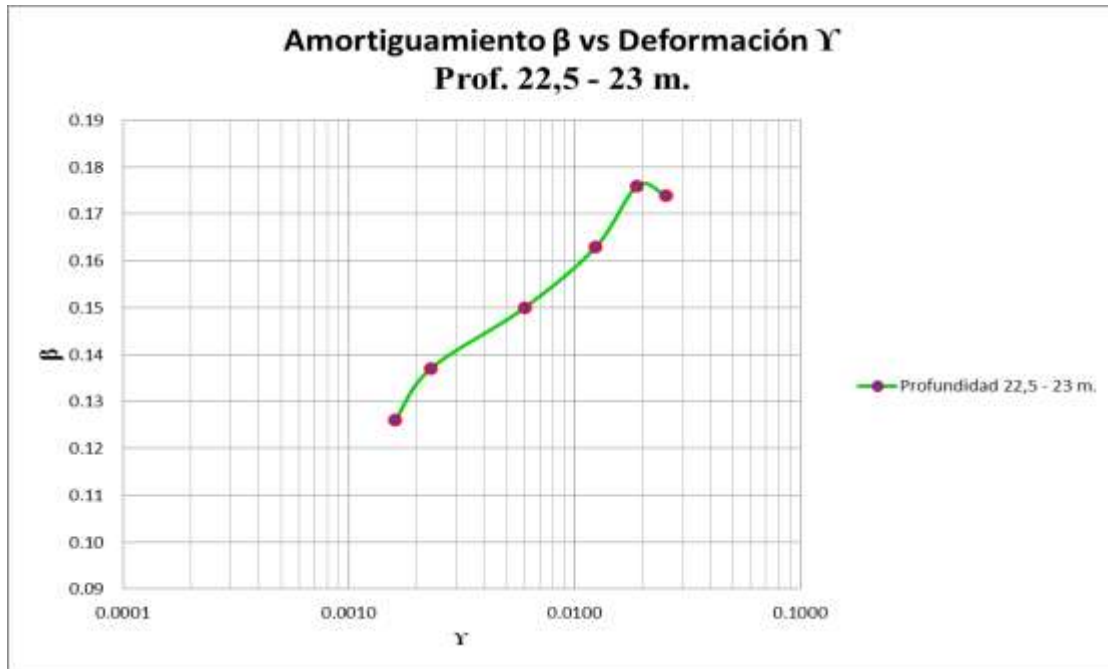
Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 27. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 22.5 - 23 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 28. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 22.5 - 23 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

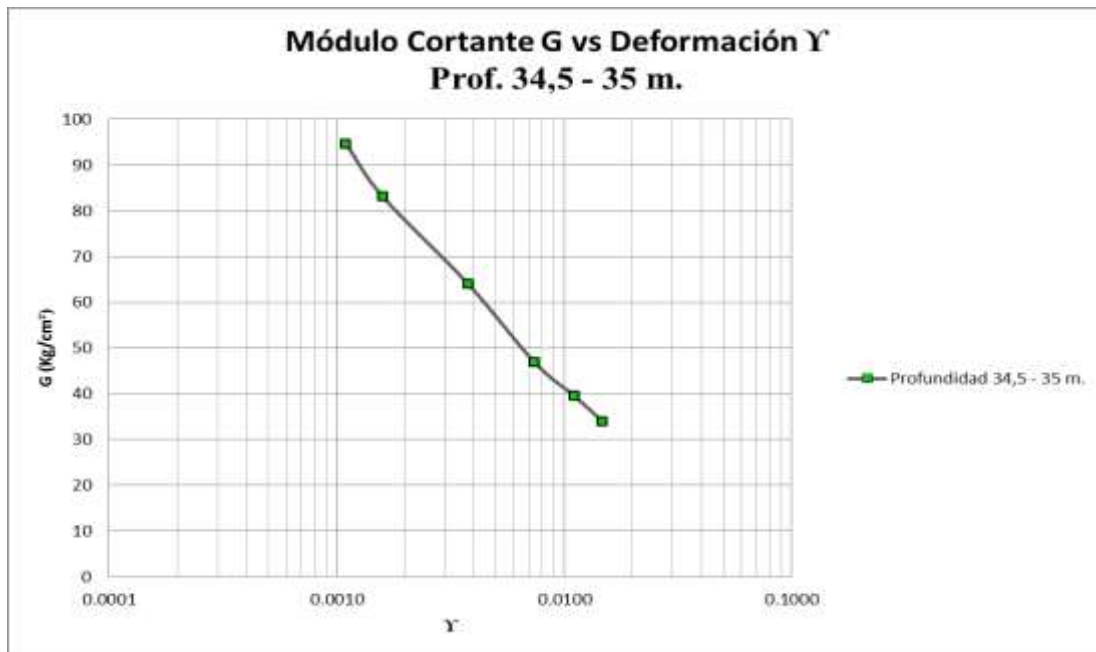
#### 6.1.2.3.4 Profundidad 34.5 – 35 m

Tabla 13. Resultados ensayo triaxial para 34.5 – 35 m de profundidad

Ciclo	$\gamma$	$\beta$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	0.0148	0.156	33.9
12	0.0111	0.165	39.5
11	0.0074	0.171	46.9
10	0.0038	0.175	63.9
9	0.0016	0.144	83
8	0.0011	0.153	94.6

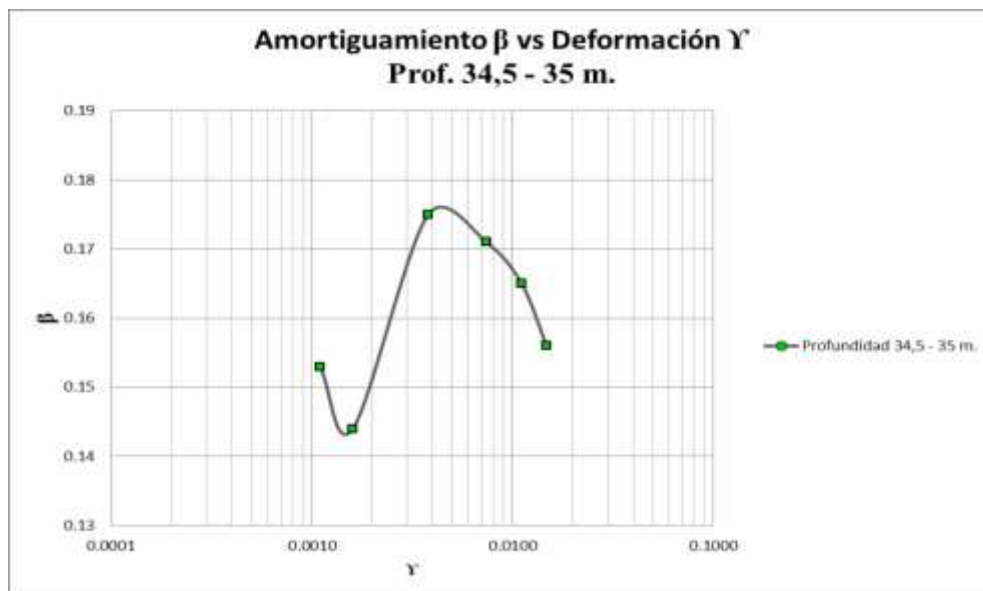
Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 29. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 34.5 - 35 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 30. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 34.5 - 35 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

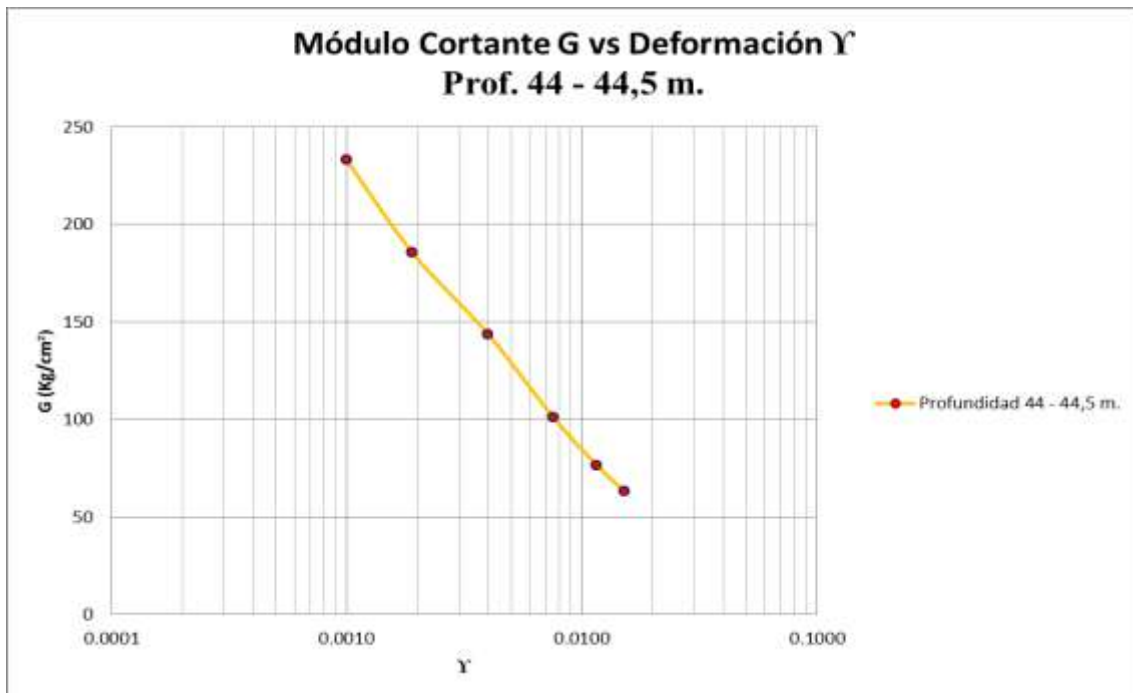
6.1.2.3.5 Profundidad 44 – 44.5 m

Tabla 14. Resultados ensayo triaxial para 44 – 44.5 m de profundidad

Ciclo	$\gamma$	$\beta$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )
13	0.0152	0.221	63.3
12	0.0116	0.22	76.5
11	0.0076	0.21	100.9
10	0.0040	0.179	143.6
9	0.0019	0.175	185.6
8	0.0010	0.163	233

Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 31. Gráfica de Módulo Cortante Vs Deformación para 44 – 44.5 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

Figura 32. Gráfica de Amortiguamiento Vs Deformación para 44 – 44.5 m de profundidad



Fuente: CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006

A partir de los resultados de los triaxiales anteriormente presentados, el ensayo de Down-Hole y de Velocidad de Onda se empieza a construir las curvas de degradación del módulo de cortante  $G/G_{max}$  y amortiguamiento  $\beta$  respecto a la deformación.

## 6.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

A continuación se obtiene el perfil geotécnico de la zona de estudio, a partir del análisis de los resultados de los ensayos expuestos en la fase anterior.

En primera instancia, se muestra el análisis del ensayo Down Hole realizado en el lugar de estudio, el cual permite realizar una caracterización del suelo en función de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ).

En segunda instancia, se definen los parámetros estáticos y dinámicos del suelo a partir de los resultados de los ensayos realizados, y de las correlaciones expuestas en el marco teórico de la presente investigación.

En la tabla 15, se presenta el cálculo de  $V_s$  por el método de “tiempos corregidos”, el cual consiste en calcular el valor de  $V_s$  a cada profundidad, a partir de una función matemática. Para lo anterior, debe en primera instancia calcular un  $t^*$  el cual se define como un tiempo corregido, luego, definir los  $\Delta t^*$  entre dos lecturas sucesivas, para finalmente calcular el valor de  $V_s^*$ , a partir de las siguientes ecuaciones (los parámetros “z” y “x” tienen la misma definición que en el Down-Hole):

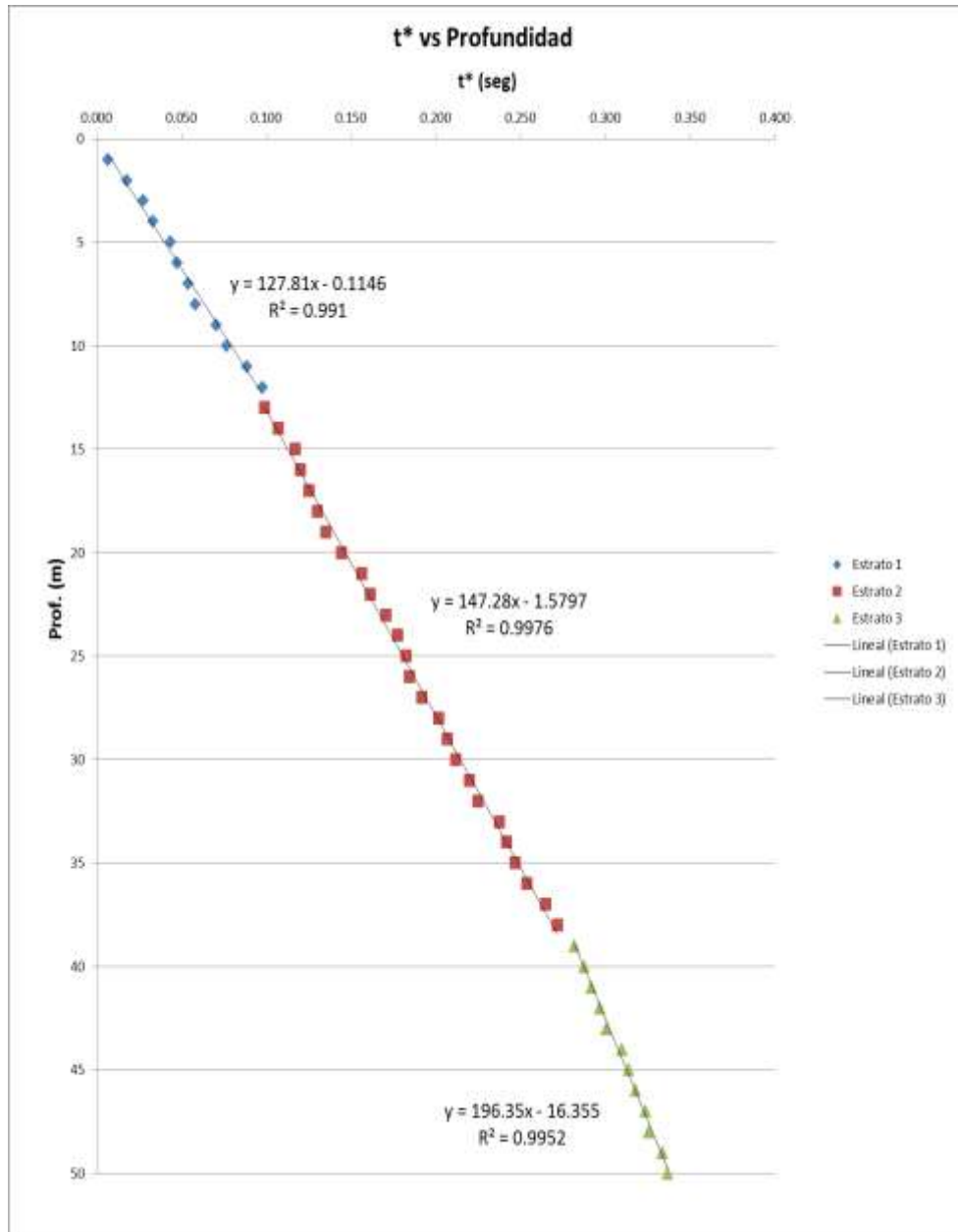
$$t^* = \frac{z}{d} \quad t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + x^2}} \quad t \quad V_s^* = \frac{\Delta z}{\Delta t^*}$$

Tabla 15. Datos del ensayo Down Hole y Calculo de Vs\* con el método de los tiempos corregidos t\*

Down-hole			Cálculo Vs*							
Prof. (m)	Tiempo (seg)	X (m)	R (m)	ΔR (m)	Δt (seg)	Vs (m/seg)	t*	Δt* (seg)	ΔZ (m)	Vs* (m/seg)
1	0.015	2	2.236				0.007			
2	0.025	2	2.828	0.592	0.010	59.236	0.018	0.011	1.0	91.2
3	0.033	2	3.606	0.777	0.008	97.141	0.027	0.010	1.0	102.2
4	0.037	2	4.472	0.867	0.004	216.646	0.033	0.006	1.0	177.4
5	0.047	2	5.385	0.913	0.010	91.303	0.044	0.011	1.0	94.8
6	0.05	2	6.325	0.939	0.003	313.130	0.047	0.004	1.0	263.5
7	0.056	2	7.280	0.956	0.006	159.259	0.054	0.006	1.0	156.0
8	0.06	2	8.246	0.966	0.004	241.525	0.058	0.004	1.0	229.2
9	0.072	2	9.220	0.973	0.012	81.111	0.070	0.012	1.0	82.8
10	0.078	2	10.198	0.978	0.006	163.082	0.076	0.006	1.0	161.3
11	0.09	2	11.180	0.982	0.012	81.858	0.089	0.012	1.0	82.9
12	0.099	2	12.166	0.985	0.009	109.465	0.098	0.009	1.0	109.8
13	0.1	2	13.153	0.987	0.001	987.421	0.099	0.001	1.0	844.5
14	0.108	2	14.142	0.989	0.008	123.649	0.107	0.008	1.0	123.8
15	0.118	2	15.133	0.991	0.010	99.061	0.117	0.010	1.0	99.5
16	0.121	2	16.125	0.992	0.003	330.590	0.120	0.003	1.0	322.5
17	0.126	2	17.117	0.993	0.005	198.545	0.125	0.005	1.0	197.2
18	0.131	2	18.111	0.994	0.005	198.706	0.130	0.005	1.0	197.6
19	0.136	2	19.105	0.994	0.005	198.841	0.135	0.005	1.0	197.9
20	0.145	2	20.100	0.995	0.009	110.531	0.144	0.009	1.0	110.8
21	0.157	2	21.095	0.995	0.012	82.939	0.156	0.012	1.0	83.2
22	0.162	2	22.091	0.996	0.005	199.140	0.161	0.005	1.0	198.3
23	0.171	2	23.087	0.996	0.009	110.675	0.170	0.009	1.0	110.8
24	0.178	2	24.083	0.996	0.007	142.342	0.177	0.007	1.0	142.3
25	0.183	2	25.080	0.997	0.005	199.337	0.182	0.005	1.0	198.7
26	0.185	2	26.077	0.997	0.002	498.469	0.184	0.002	1.0	490.7
27	0.192	2	27.074	0.997	0.007	142.452	0.191	0.007	1.0	142.4
28	0.202	2	28.071	0.997	0.010	99.736	0.201	0.010	1.0	99.9
29	0.207	2	29.069	0.998	0.005	199.509	0.207	0.005	1.0	199.1
30	0.212	2	30.067	0.998	0.005	199.542	0.212	0.005	1.0	199.2
31	0.22	2	31.064	0.998	0.008	124.732	0.220	0.008	1.0	124.8
32	0.225	2	32.062	0.998	0.005	199.598	0.225	0.005	1.0	199.3
33	0.238	2	33.061	0.998	0.013	76.778	0.238	0.013	1.0	76.9
34	0.242	2	34.059	0.998	0.004	249.556	0.242	0.004	1.0	248.9
35	0.247	2	35.057	0.998	0.005	199.665	0.247	0.005	1.0	199.4
36	0.254	2	36.056	0.998	0.007	142.631	0.254	0.007	1.0	142.6
37	0.265	2	37.054	0.999	0.011	90.773	0.265	0.011	1.0	90.9
38	0.272	2	38.053	0.999	0.007	142.654	0.272	0.007	1.0	142.6
39	0.282	2	39.051	0.999	0.010	99.865	0.282	0.010	1.0	99.9
40	0.288	2	40.050	0.999	0.006	166.453	0.288	0.006	1.0	166.4
41	0.292	2	41.049	0.999	0.004	249.696	0.292	0.004	1.0	249.2
42	0.297	2	42.048	0.999	0.005	199.768	0.297	0.005	1.0	199.6
43	0.301	2	43.046	0.999	0.004	249.724	0.301	0.004	1.0	249.3
44	0.31	2	44.045	0.999	0.009	110.994	0.310	0.009	1.0	111.0
45	0.314	2	45.044	0.999	0.004	249.748	0.314	0.004	1.0	249.4
46	0.318	2	46.043	0.999	0.004	249.759	0.318	0.004	1.0	249.4
47	0.324	2	47.043	0.999	0.006	166.513	0.324	0.006	1.0	166.5
48	0.326	2	48.042	0.999	0.002	499.557	0.326	0.002	1.0	497.4
49	0.334	2	49.041	0.999	0.008	124.894	0.334	0.008	1.0	124.9
50	0.337	2	50.040	0.999	0.003	333.062	0.337	0.003	1.0	332.4

Fuente: Autoría propia

Figura 33. Gráfica Tiempo (t\*) vs Profundidad



Fuente: Autoría propia

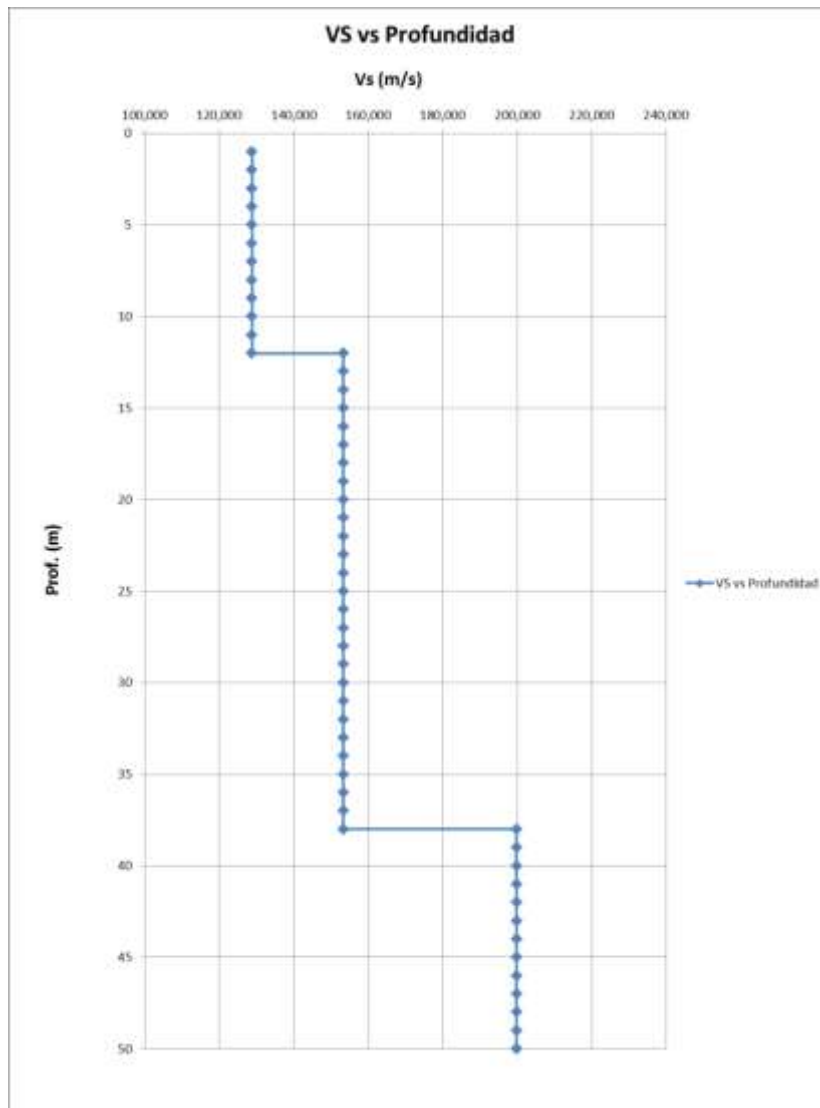
A partir de las regresiones lineales que se observan en la gráfica anterior, y luego de revisar los resultados de los ensayos para caracterización estática, teniendo en cuenta el índice de plasticidad y el peso unitario total se define el perfil geotécnico del suelo proponiendo 3 estratos de la siguiente forma:

Tabla 16. Estratos propuestos a partir de Vs

ESTRATO	Profundidad (m)	Vs (m/s)
1	0-12	128,77
2	12-38	153,31
3	38-50	199,82

Fuente: Autoría propia

Figura 34. Velocidades de onda de corte Vs promedio por estrato vs Profundidad a partir de Down-Hole



Fuente: Autoría propia

La grafica anterior muestra las velocidades de onda promedio para cada estrato definido en la tabla 16.

## 6.2.1 Parámetros Estáticos

Tabla 17. Parámetros Estáticos

Muestra No.	Profundidad (m)		Clasif. USCS	Descripción	W <sub>n</sub>	L.L	L.P	I.P	G <sub>s</sub>	e	n (%)	Sr (%)	Y <sub>d</sub> (T/m <sup>3</sup> )	Y <sub>T</sub> (T/m <sup>3</sup> )	C <sub>u</sub> (T/m <sup>2</sup> )	q <sub>u</sub> (T/m <sup>2</sup> )
	Desde	Hasta														
	0	1	CH	Arcilla limosa de plasticidad alta, consistencia media, con un estrato de arena fina a media limosa de color gris de 8 a 12 m.	28,55	41,83	18,94	22,90	2,74	0,63	38,83	100,00	1,47	1,90	2,26	4,16
1	1	2														
2	2	3														
3	3	4														
5	4	5														
6-7	5	6														
	6	7														
8	7	8														
9	8	9														
	9	10														
	10	11														
	11	12														
14	12	13	CH	Arcilla limosa de plasticidad alta, consistencia media, con pequeños estratos de arena fina limosa y limo.	112,64	149,14	41,98	107,17	2,33	2,72	73,11	100,00	0,63	1,35	2,30	4,78
	13	14														
15	14	15														
	15	16														
	16	17														
	17	18														
	18	19														
	19	20														
18	20	21														
	21	22														
	22	23														
	23	24														
	24	25														
	25	26														
	26	27														
	27	28														
	28	29														
	29	30														
	30	31														
	31	32														
	32	33														
	33	34														
	34	35														
	35	36														
	36	37														
	37	38														
	38	39														
	39	40	CL-ML	Arcilla limosa de baja plasticidad con pequeños estratos de limo.	41,59	43,73	26,17	17,56	2,72	0,98	49,57	100,00	1,23	1,75	2,70	6,83
	40	41														
	41	42														
	42	43														
	43	44														
	44	45														
	45	46														
	46	47														
	47	48														
	48	49														
	49	50														

Fuente: Autoría propia

Es importante tener en cuenta que en el primer estrato de 0-12m. De profundidad, se incluye un estrato de arena fina a media limosa de color gris de 8-12m. El cual no es homogéneo sino que está compuesto por lentes intercalados donde predomina la arcilla, (debido a esto no se definió como estrato individual). Sin embargo afecta el comportamiento del índice de plasticidad y de la resistencia del primer estrato.

### 6.2.2 Parámetros Dinámicos

Para la determinación de los parámetros dinámicos, se utilizó la velocidad de onda de corte obtenida por el método de tiempos corregidos, mas no la que se obtuvo por medio de las correlaciones propuestas por el Ingeniero Alfaro, puesto que los resultados obtenidos por el método de tiempos corregidos, son más consistentes con los resultados reportados en la microzonificación sísmica para esta zona de Bogotá y en el estudio realizado por la firma CEI S.A.

Tabla 18. Parámetros Dinámicos

Estrato	Prof. (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Relación Poisson	G Máximo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Amortiguam. Máximo $\beta$ (%)	E (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	0-12	128,77	315,41	0,40	321,90	0,15	901,33
2	12-38	153,31	375,53	0,40	361,78	0,16	1013,00
3	38-50	199,82	489,45	0,40	730,68	0,19	2045,89

Fuente: Autoría propia.

Los anteriores parámetros se obtuvieron aplicando las ecuaciones respectivas presentadas en el marco teórico.

### 6.2.3 Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte

A partir de la velocidad de onda de corte calculada para cada estrato, y de acuerdo a la clasificación de perfiles de suelo que propone el Reglamento Colombiano de Normas Sismo Resistentes NSR-10, se plantea el siguiente perfil:

Tabla 19. Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte

ESTRATO	Profundidad (m)	Vs (m/s)	TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN
1	0-12	128,77	E	Arcillas blandas
2	12-38	153,31	E	Arcillas blandas
3	38-50	199,82	D	Suelos rígidos

Fuente: Autoría propia.

De acuerdo con las velocidades de onda presentadas para cada estrato se puede afirmar que la velocidad de onda es directamente proporcional a la rigidez, los estratos 1 y 2 son suelos blandos, por consiguiente la velocidad de onda de corte es menor que la correspondiente al estrato 3 que pertenece a un suelo rígido, ya que los suelos blandos tienen mayor capacidad de disipación de energía.

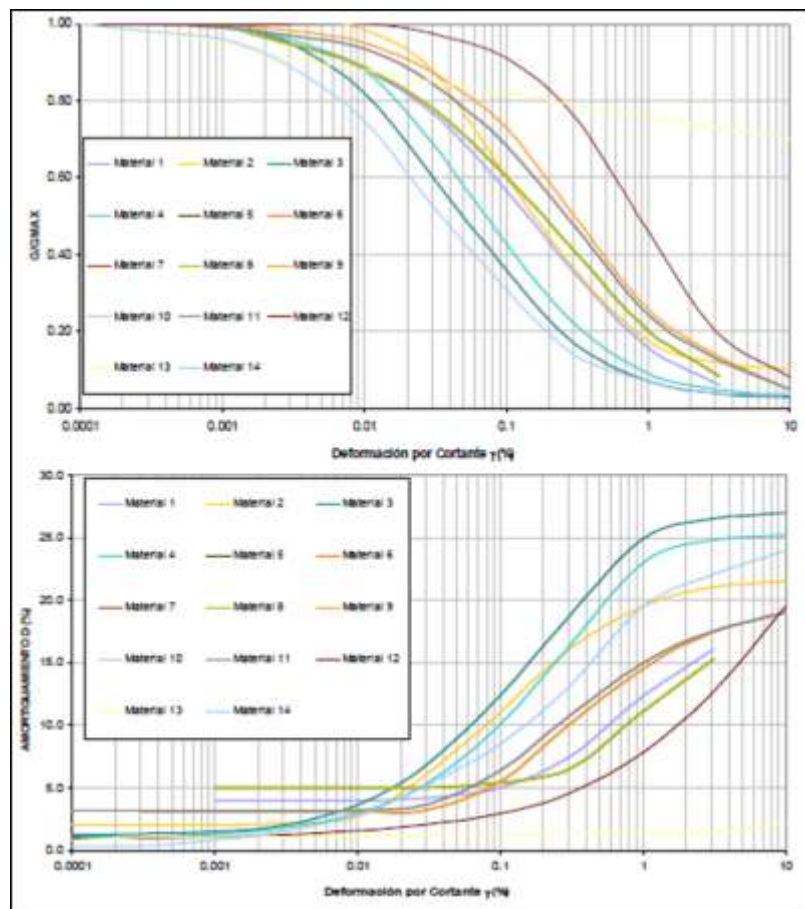
### 6.3 CURVAS DINÁMICAS

#### 6.3.1 Curvas dinámicas típicas de la microzonificación sísmica (2010) para arcillas de la sabana de Bogotá.

A continuación se muestran las curvas teóricas obtenidas de la microzonificación sísmica (2010) para las arcillas de la sabana de Bogotá D.C., de las cuales se tomó como referencia la curva correspondiente al material 8 que corresponde a “arcillas sabana 3” ya que tiene características similares a las de la zona de estudio, con el fin de comparar con las curvas dinámicas obtenidas para los suelos objeto de la presente investigación.

Figura 35. Curvas dinámicas típicas de la microzonificación sísmica para arcillas típicas de la Sabana de Bogotá

Material	Descripción	Módulo de corte máximo G <sub>máx</sub> (kPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Fuente Curvas Dinámicas
1	Relleno (CHIP50)	36250	150	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
2	Limos arcillo-arenosos (IP30)	36000	150	Arena Seed (límite superior), 1970 + confinamiento 200kPa
3	Arena y Gravas	96800	220	Rolins, arenas entre 6-15m
4	Arena y Gravas profundas	180000	300	Rolins, arenas entre 15-37m
5	Arcilla IP60	28812	140	MZSB IP60
6	Arcilla Sabana 1	15972	110	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
7	Arcilla Sabana 2	22308	130	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
8	Arcilla Sabana 3	31081	149	Modelo Geotécnico de la Sabana SCG
9	Arcilla Transición	62424	204	MZSB IP60
10	Arcilla Subachoque 1	115094	277	MZSB IP60
11	Arcilla Subachoque 2	178563	332	MZSB IP60
12	Residual IP60 180-200m	425488	450	Vucetic and Dobry (1991)
13	Roca arcillolita	1225000	700	Base de datos Curvas Dinámicas IGR
14	Coluación	288000	400	Coluación de Caracas (Seed 1970, I <sub>2</sub> =90)



Fuente: ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones. Bogotá. 2010.

Luego de hallar los parámetros estáticos y dinámicos del suelo del sitio de estudio, revisando los resultados del ensayo de Down-Hole, velocidad de onda de corte y superponiendo los resultados de los triaxiales, se realiza la modelación de las propiedades dinámicas aplicando el modelo tipo Masing para la normalización de las curvas dinámicas. Posteriormente se realiza la comparación de estas con la curva teórica seleccionada (Material 8) de la Microzonificación sísmica de Bogotá.

### 6.3.2 Curvas de degradación de módulo de corte y amortiguamiento sin normalizar

A continuación se presentan las curvas dinámicas por estrato antes de aplicar el modelo tipo Masing:

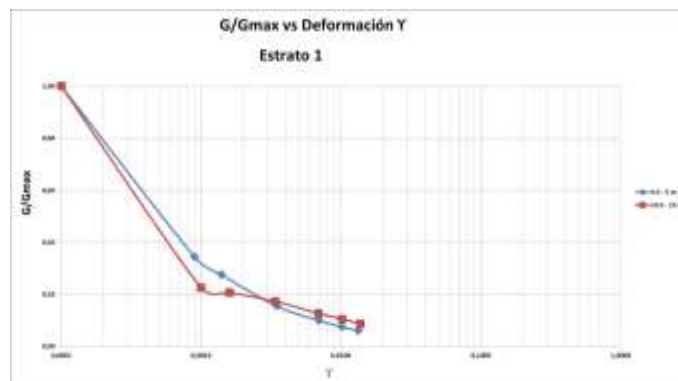
#### 6.3.2.1 Curvas dinámicas sin normalizar estrato 1. (0 - 12m).

Tabla 20. Módulo de corte sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.)

ESTRATO 1 (4,5 - 5 m)			ESTRATO 1 (14,5 - 15 m)		
Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax
0,0133	19,4	0,06	0,0138	27,7	0,09
0,0102	24,1	0,07	0,0102	33,9	0,11
0,0070	31,9	0,10	0,0069	40,8	0,13
0,0035	49,6	0,15	0,0034	55,6	0,17
0,0014	88,5	0,27	0,0016	66,7	0,21
0,0009	110,7	0,34	0,0010	72,7	0,23
0,00010	321,90	1,00	0,0001	321,90	1,00

Fuente: Autoría propia

Figura 36. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.)



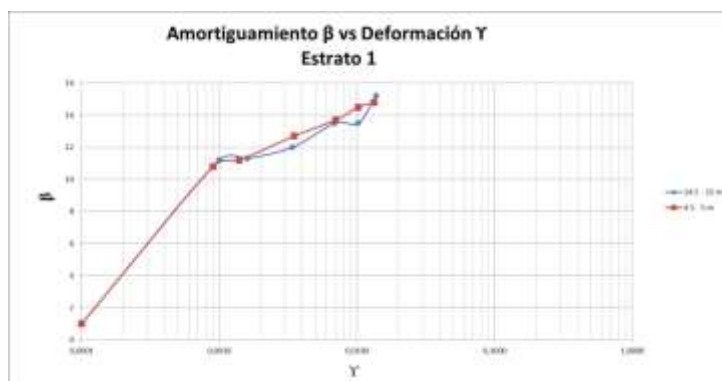
Fuente: Autoría propia.

Tabla 21. Amortiguamiento sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.)

ESTRATO 1 (4,5 - 5 m)			ESTRATO 1 (14,5 - 15 m)		
$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$	$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$
0,0133	0,148	14,8	0,0138	0,152	15,2
0,0102	0,145	14,5	0,0102	0,135	13,5
0,0070	0,137	13,7	0,0069	0,135	13,5
0,0035	0,127	12,7	0,0034	0,12	12
0,0014	0,112	11,2	0,0016	0,113	11,3
0,0009	0,108	10,8	0,0010	0,112	11,2
0,00010	0,01	1	0,0001	0,01	1

Fuente: Autoría propia

Figura 37. Amortiguamiento sin normalizar estrato 1. (0 – 12m.)



Fuente: Autoría propia

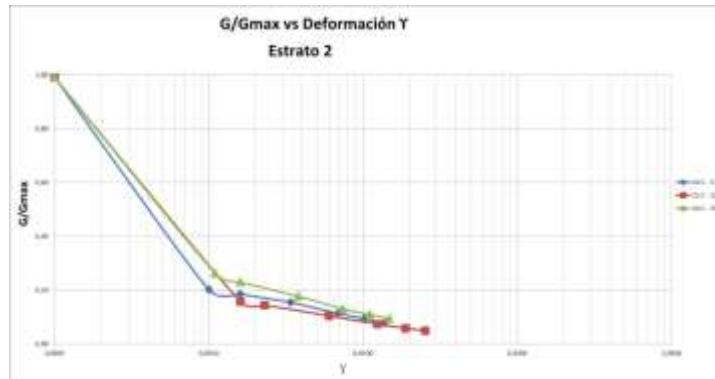
### 6.3.2.2 Curvas dinámicas sin normalizar estrato 2. (12 – 38m).

Tabla 22. Módulo de corte sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.)

ESTRATO 2 (14,5 - 15 m)			ESTRATO 2 (22,5 - 23 m)			ESTRATO 2 (34,5 - 35 m)		
$\gamma$	$G$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$G/G_{max}$	$\gamma$	$G$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$G/G_{max}$	$\gamma$	$G$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	$G/G_{max}$
0,0138	27,7	0,08	0,0253	17,7	0,05	0,0148	33,9	0,09
0,0102	33,9	0,09	0,0189	21,1	0,06	0,0111	39,5	0,11
0,0069	40,8	0,11	0,0124	26,5	0,07	0,0074	46,9	0,13
0,0034	55,6	0,15	0,0060	37,8	0,10	0,0038	63,9	0,18
0,0016	66,7	0,18	0,0023	52,1	0,14	0,0016	83	0,23
0,0010	72,7	0,20	0,0016	56,7	0,16	0,0011	94,6	0,26
0,0001	361,78	0,99	0,0001	361,7849571	0,99	0,0001	361,78	0,99

Fuente: Autoría propia

Figura 38. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.)



Fuente: Autoría propia

Tabla 23. Amortiguamiento sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.)

ESTRATO 2 (14,5 - 15 m)			ESTRATO 2 (22,5 - 23 m)			ESTRATO 2 (34,5 - 35 m)		
$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$	$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$	$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$
0,0138	0,152	15,2	0,0253	0,174	17,4	0,0148	0,156	15,6
0,0102	0,135	13,5	0,0189	0,176	17,6	0,0111	0,165	16,5
0,0069	0,135	13,5	0,0124	0,163	16,3	0,0074	0,171	17,1
0,0034	0,12	12	0,0060	0,15	15	0,0038	0,175	17,5
0,0016	0,113	11,3	0,0023	0,137	13,7	0,0016	0,144	14,4
0,0010	0,112	11,2	0,0016	0,126	12,6	0,0011	0,153	15,3
0,0001	0,01	1	0,0001	0,01	1	0,0001	0,01	1

Fuente: Autoría propia

Figura 39. Curvas amortiguamiento sin normalizar estrato 2. (12 – 38m.)



Fuente: Autoría propia

### 6.3.2.3 Curvas dinámicas sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.)

Tabla 24. Módulo de corte sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.)

ESTRATO 3 (34,5 - 35 m)			ESTRATO 3 (44- 44,5 m)		
$\gamma$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	$\gamma$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax
0,0148	33,9	0,05	0,0152	63,3	0,09
0,0111	39,5	0,05	0,0116	76,5	0,10
0,0074	46,9	0,06	0,0076	100,9	0,14
0,0038	63,9	0,09	0,0040	143,6	0,20
0,0016	83	0,11	0,0019	185,6	0,25
0,0011	94,6	0,13	0,0010	233	0,32
0,0001	730,68	1,00	0,0001	730,68	0,99

Fuente: Autoría propia

Figura 40. Curvas módulo de corte sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.)



Fuente: Autoría propia

Tabla 25. Amortiguamiento sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.)

ESTRATO 3 (34,5 - 35 m)			ESTRATO 3 (44- 44,5 m)		
$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$	$\gamma$	$\beta$	$\beta \%$
0,0148	0,156	15,6	0,0152	0,221	22,1
0,0111	0,165	16,5	0,0116	0,22	22
0,0074	0,171	17,1	0,0076	0,21	21
0,0038	0,175	17,5	0,0040	0,179	17,9
0,0016	0,144	14,4	0,0019	0,175	17,5
0,0011	0,153	15,3	0,0010	0,163	16,3
0,0001	0,01	1	0,0001	0,01	1

Fuente: Autoría propia

Figura 41. Curvas amortiguamiento sin normalizar estrato 3. (38 – 50m.)



Fuente: Autoría propia

De acuerdo con las curvas dinámicas anteriormente presentadas, se puede observar que se aprovecharon y distribuyeron los ensayos de acuerdo a su profundidad, luego se obtuvo una curva promedio en cada estrato para posteriormente aplicar el modelo tipo Masing con el fin de ajustar las curvas dinámicas en función del índice de plasticidad como se presenta a continuación.

### 6.3.3 Curvas normalizadas de Módulo de corte $G$ vs Deformación $\gamma$

A continuación se presenta la comparación de las curvas dinámicas promedio y normalizadas para cada estrato con las respectivas curvas teóricas (microzonificación sísmica, Dobry y Vucetic con su IP correspondiente).

**Las casillas resaltadas en amarillo en cada una de las tablas de datos corresponden a un valor obtenido de la tabulación de Roblee y Chiou presentada en el marco teórico para completar las curvas dinámicas con el criterio de continuar la tendencia adecuada.**

6.3.3.1 Estrato 1 Profundidad 0 – 12 m

Tabla 26. Normalización módulo de corte - Estrato 1

ESTRATO 1								
$\gamma$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	$\gamma_r$	A	2B	H( $\gamma$ )	Gmod	G/Gmax
<b>1</b>								<b>0,082</b>
0,0136	23,55	0,07	0,0025	0,61	1,24	0,93169259	43,92964	0,14838548
0,0102	29	0,09	0,0025	0,61	1,24	0,90635892	51,4879852	0,17391605
0,0070	36,35	0,11	0,0025	0,61	1,24	0,85961549	65,43397	0,22102278
0,0035	52,6	0,16	0,0025	0,61	1,24	0,73118393	103,75176	0,35045256
0,0015	77,6	0,24	0,0025	0,61	1,24	0,52408085	165,541335	0,55916531
0,0010	91,7	0,28	0,0025	0,61	1,24	0,40962609	199,689119	0,67450965
0,00010	321,90	1,00	0,0025	0,61	1,24	0,08664605	296,050794	1

Fuente: Autoría propia.

Figura 42. Gráfica G/Gmax vs Deformación  $\gamma$  - Estrato 1



Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que el módulo de corte del estrato 1 tiene su mayor degradación en el intervalo de deformación entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$ , lo cual difiere de la curva teórica propuesta por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 15, la cual presenta la mayor degradación de módulo de corte en el intervalo de deformación entre  $10^{-2}$  a 1.

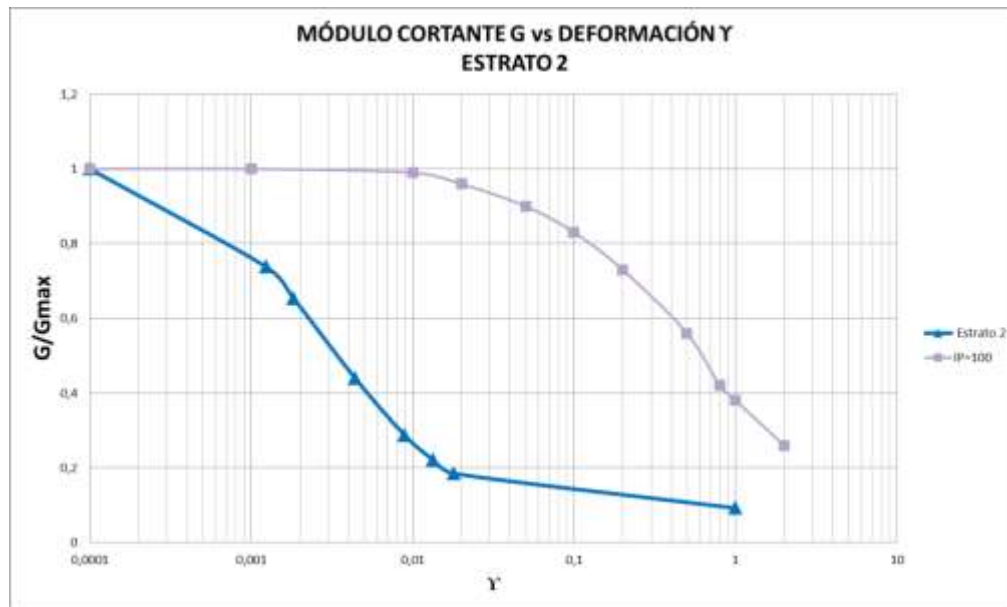
6.3.3.2 Estrato 2 Profundidad 12 – 38 m

Tabla 27. Normalización módulo de corte - Estrato 2

ESTRATO 2								
Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	Yr	A	2B	H(Y)	Gmod	G/Gmax
<b>1</b>								<b>0,092</b>
0,018	26,433	0,07	0,0045	0,66	1,18	0,88896565	63,6688836	0,18475402
0,013	31,500	0,09	0,0045	0,66	1,18	0,85143816	76,2537868	0,22127283
0,009	38,067	0,11	0,0045	0,66	1,18	0,7835187	99,0306882	0,28736671
0,004	52,433	0,14	0,0045	0,66	1,18	0,62732779	151,409564	0,43935945
0,002	67,267	0,19	0,0045	0,66	1,18	0,40831195	224,85688	0,65248848
0,001	74,667	0,21	0,0045	0,66	1,18	0,32054821	254,288593	0,73789326
0,0001	361,785	1,00	0,0045	0,66	1,18	0,05120186	344,614332	1

Fuente: Autoría propia.

Figura 43. Gráfica G/Gmax vs Deformación - Estrato 2



Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que el módulo de corte del estrato 2 tiene su mayor degradación en el intervalo de deformación entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$ , lo cual difiere de la curva teórica propuesta por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 100, la cual presenta la mayor degradación de módulo de corte en el intervalo de deformación entre  $10^{-1}$  a 1.

6.3.3.3 Estrato 3 Profundidad 38 – 50 m

Tabla 28. Normalización módulo de corte - Estrato 2

ESTRATO 3								
$\gamma$	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	$\gamma_r$	A	2B	H( $\gamma$ )	Gmod	G/Gmax
1								0,116
0,015	48,600	0,07	0,00245	0,605	1,25	0,94198285	88,1721044	0,13147694
0,011	58,000	0,08	0,00245	0,605	1,25	0,92030855	102,955622	0,15352123
0,008	73,900	0,10	0,00245	0,605	1,25	0,87500129	133,858616	0,19960192
0,004	103,750	0,14	0,00245	0,605	1,25	0,76433095	209,344202	0,31216149
0,002	134,300	0,18	0,00245	0,605	1,25	0,57128737	341,014594	0,50850046
0,001	163,800	0,22	0,00245	0,605	1,25	0,44004488	430,53194	0,64198334
0,0001	730,676	1,00	0,00245	0,605	1,25	0,08803725	670,627898	1

Fuente: Autoría propia.

Figura 44. Gráfica G/Gmax vs Deformación - Estrato 3



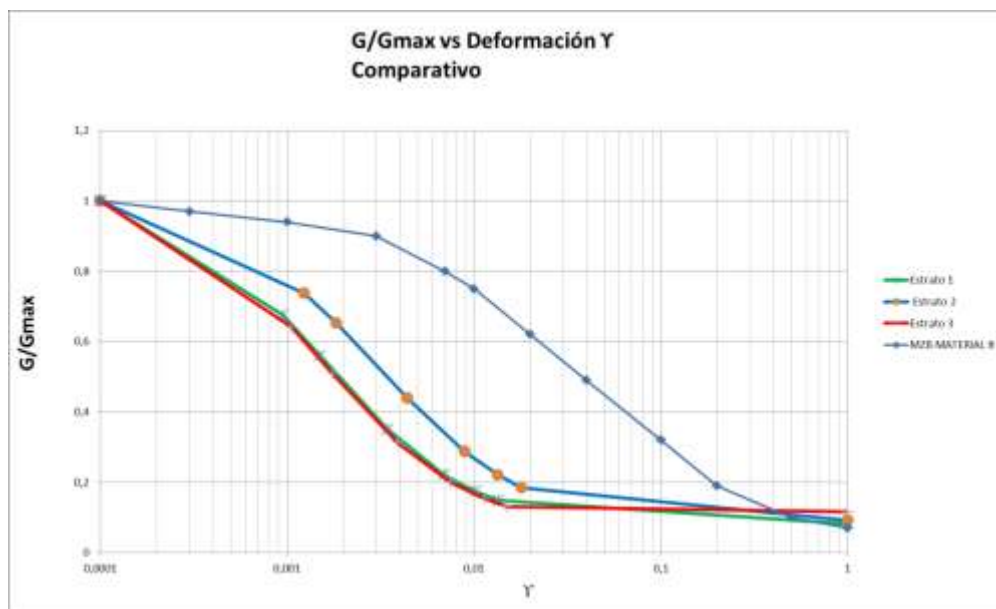
Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que el módulo de corte del estrato 3 tiene su mayor degradación en el intervalo de deformación entre  $10^{-3}$  y  $10^{-2}$ , lo cual difiere de la curva teórica propuesta por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 15, la cual presenta la mayor degradación de módulo de corte en el intervalo de deformación entre  $10^{-2}$  a 1.

### 6.3.3.4 Comparación de las curvas de degradación de módulo de corte

A continuación se muestra una gráfica comparativa de las curvas de degradación de módulo de corte de los tres estratos propuestos para la zona de estudio y la obtenida de la microzonificación sísmica de Bogotá para (Material 8) arcillas de la sabana para su respectivo análisis.

Figura 45. Gráfica comparativa curvas de degradación de módulo de corte



Fuente: Autoría propia.

Tomando como referencia el estrato 2, en el cual el valor promedio del índice de plasticidad es de 107.17% se observa, que el material tiene mayor resistencia al corte que los estratos 1 y 3, los cuales tienen un índice de plasticidad de 22.90% y 17.56% respectivamente, lo cual indica que el índice de plasticidad es directamente proporcional a la resistencia al corte del suelo.

En las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas para la zona de estudio, se puede observar que la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de deformaciones intermedias y grandes, (aproximadamente  $10^{-3}$  % a  $10^{-2}$  %). Lo anterior es congruente con la curva reportada en la microzonificación sísmica, para las arcillas típicas

de Bogotá, pero sin dejar de tener en cuenta que para las arcillas de la zona de estudio el módulo de rigidez se empieza a degradar a partir de un porcentaje de deformación inferior a la curva de referencia.

### 6.3.4 Curvas de Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación $\gamma$

#### 6.3.4.1 Estrato 1 Profundidad 0 – 12 m

Tabla 29. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 1

ESTRATO 1								
$\gamma$	$\beta$	$\beta$ (Norm)	$\gamma_r$	A	2B	H( $\gamma$ )	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>1</b>								<b>17</b>
<b>0,316</b>								<b>16,12</b>
0,0136	0,15	15	0,0025	0,61	1,24	0,93169259	0,14043696	14,0436962
0,0102	0,14	14	0,0025	0,61	1,24	0,90635892	0,13689025	13,6890249
0,0070	0,136	13,6	0,0025	0,61	1,24	0,85961549	0,13034617	13,0346169
0,0035	0,1235	12,35	0,0025	0,61	1,24	0,73118393	0,11236575	11,236575
0,0015	0,1125	11,25	0,0025	0,61	1,24	0,52408085	0,08337132	8,3371319
0,0010	0,11	11	0,0025	0,61	1,24	0,40962609	0,06734765	6,73476525
0,00035	0,01	1	0,0025	0,61	1,24	0,21475787	0,0400661	4,00661013

Fuente: Autoría propia.

Figura 46. Gráfica Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación – Estrato 1



Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que la razón de amortiguamiento del estrato 1 aumenta considerablemente en el rango de las deformaciones intermedias (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-1}$  %) y en las curvas propuestas por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 15, la razón de amortiguamiento aumenta considerablemente en el rango de las grandes deformaciones y el estado de falla (aproximadamente  $10^{-2}$ % a 1%).

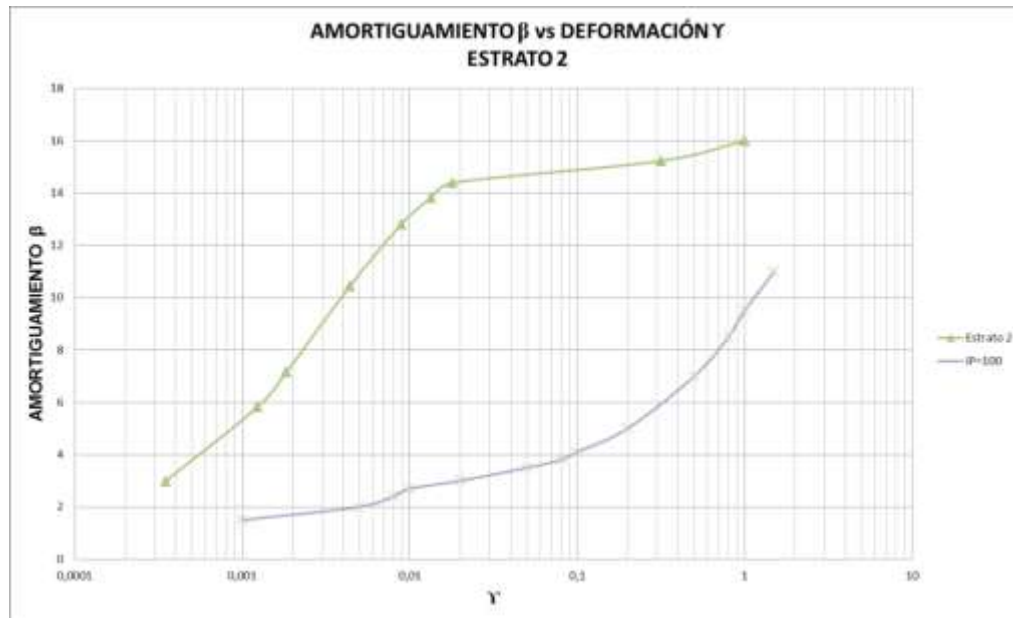
#### 6.3.4.2 Estrato 2 Profundidad 12 – 38 m

Tabla 30. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 2

ESTRATO 2								
Y	$\beta$	$\beta$ (Norm)	Yr	A	2B	H(Y)	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>1</b>								<b>16</b>
<b>0,316</b>								<b>15,23</b>
0,0180	0,16066667	16,07	0,0045	0,66	1,18	0,88896565	0,14393749	14,3937491
0,0134	0,15866667	15,87	0,0045	0,66	1,18	0,85143816	0,13828335	13,828335
0,0089	0,15633333	15,63	0,0045	0,66	1,18	0,7835187	0,12805015	12,8050151
0,0044	0,14833333	14,83	0,0045	0,66	1,18	0,62732779	0,10451739	10,4517387
0,0018	0,13133333	13,13	0,0045	0,66	1,18	0,40831195	0,071519	7,15190011
0,0012	0,13033333	13,03	0,0045	0,66	1,18	0,32054821	0,05829593	5,8295931
0,0004	0,01	1,00	0,0045	0,66	1,18	0,13257303	0,02997434	2,99743367

Fuente: Autoría propia.

Figura 47. Gráfica Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación – Estrato 2



Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que la razón de amortiguamiento del estrato 2 aumenta considerablemente en el rango de las deformaciones intermedias (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-1}$  %) y en las curvas propuestas por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 100, la razón de amortiguamiento aumenta considerablemente en el rango de las grandes deformaciones y el estado de falla (aproximadamente  $10^{-2}$ % a 1%).

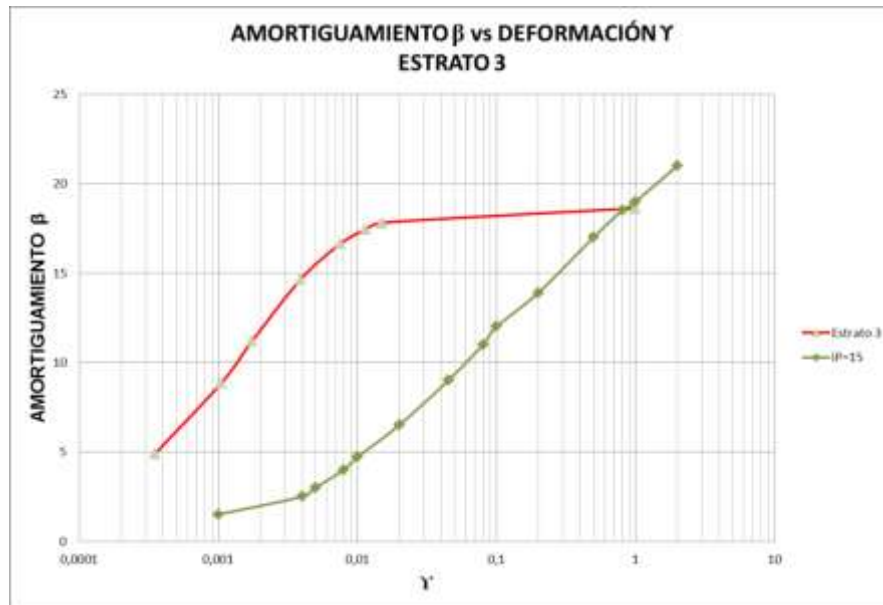
### 6.3.4.3 Estrato 3 Profundidad 38 – 50 m

Tabla 31. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 3

ESTRATO 3								
$\gamma$	$\beta$	$\beta$ (Norm)	$\gamma_r$	A	2B	H( $\gamma$ )	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>1</b>								<b>18,63</b>
0,0150	0,1885	18,85	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,94198285</b>	<b>0,17814394</b>	<b>17,8143939</b>
0,0114	0,1925	19,25	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,92030855</b>	<b>0,17427508</b>	<b>17,4275077</b>
0,0075	0,1905	19,05	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,87500129</b>	<b>0,16618773</b>	<b>16,6187731</b>
0,0039	0,177	17,70	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,76433095</b>	<b>0,14643307</b>	<b>14,6433074</b>
0,0018	0,1595	15,95	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,57128737</b>	<b>0,11197479</b>	<b>11,1974795</b>
0,0011	0,158	15,80	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,44004488</b>	<b>0,08854801</b>	<b>8,85480117</b>
0,0004	0,01	1,00	0,00245	<b>0,605</b>	<b>1,25</b>	<b>0,21816041</b>	<b>0,04894163</b>	<b>4,89416328</b>

Fuente: Autoría propia.

Figura 48. Gráfica Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación – Estrato 3



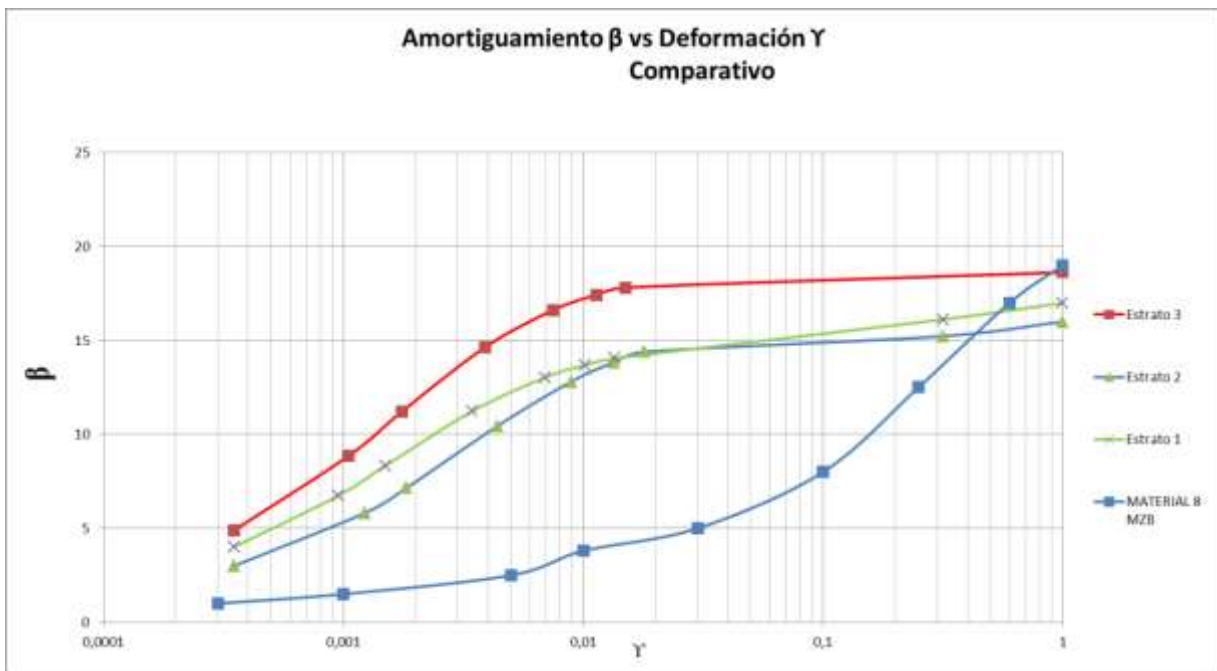
Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior se puede observar que la razón de amortiguamiento del estrato 3 aumenta considerablemente en el rango de las deformaciones intermedias (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-1}$  %) y en las curvas propuestas por Dobry y Vucetic para un índice de plasticidad de 15, la razón de amortiguamiento aumenta considerablemente en el rango de las grandes deformaciones y el estado de falla (aproximadamente  $10^{-2}$ % a 1%).

#### 6.3.4.4 Comparación de las curvas Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación

A continuación se muestra una gráfica comparativa de las curvas Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación de los tres estratos propuestos para la zona de estudio y la obtenida por el Servicio Geológico Colombiano para las arcillas de Bogotá D.C.

Figura 49. Gráfica comparativa curvas Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación



Fuente: Autoría propia.

En las curvas de amortiguamiento vs deformación obtenidas para la zona de estudio, se observa como difiere de la curva reportada en la microzonificación sísmica para las arcillas típicas de Bogotá, ya que para un rango de deformación aproximado de  $10^{-2}$  % a 10-1%, la

capacidad de disipación de energía alcanza valores entre 14 a 18% para la zona de estudio, y en la curva de la microzonificación sísmica para el mismo rango de deformación, presenta valores entre 1,5 y 5%.

#### **6.4 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DINÁMICAS DE LA AV. LONGITUDINAL DE OCCIDENTE CON AVENIDA AMÉRICAS, CON LAS DE LA AVENIDA BOYACÁ CON AVENIDA MUTIS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y LAS MUESTRAS DE ARCILLA DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

##### **6.4.1 Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis**

###### *6.4.1.1 Caracterización geotécnica Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis*

A partir de la información recuperada del IDU, se presenta en la tabla 32 el resumen de la caracterización geotécnica de la zona mencionada.

Tabla 32. Resumen de parámetros dinámicos de la Av. Boyacá con Av. Mutis

Prof. (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Relación Poisson	G Máximo (Kg/cm2)	E (Kg/cm2)	IP
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10	132.63	374.50	0.43	299.00	854.20	99.59
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33	142.35	426.32	0.44	364.80	1048.50	88.59
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48	250.06	559.24	0.38	1188.10	3267.40	91.80
49						
50						

Fuente: Autoría propia.

Revisando los parámetros dinámicos obtenidos en la caracterización dinámica de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis, se observa que tienen un mayor índice de plasticidad y a su vez un mayor módulo de corte, en comparación con los parámetros obtenidos en la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas.

A partir de la velocidad de onda de corte calculada para cada estrato, y de acuerdo a la clasificación de perfiles de suelo que propone el Reglamento Colombiano de Normas Sismo Resistentes NSR-10, se plantea el siguiente perfil:

Tabla 33. Perfil del suelo a partir de la velocidad de onda de corte Av. Boyacá con Av. Mutis

ESTRATO	Profundidad (m)	Vs (m/s)	TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN
1	0-20	132.63	E	Arcillas blandas
2	20-46	142.35	E	Arcillas blandas
3	46.50	250.06	D	Suelos rígidos

Fuente: Autoría propia.

A partir de la tabla anterior, y la tabla de perfil de suelo obtenida para la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas, se puede observar que son zonas geotécnicamente similares.

#### 6.4.1.2 Curvas dinámicas Avenida Boyacá con Avenida José Celestino Mutis

A partir de los resultados del ensayo Down Hole, y triaxial cíclico con carga controlada recuperados del IDU, se obtienen las curvas dinámicas de la zona mencionada, aplicando el modelo tipo Masing.

Las casillas resaltadas en amarillo en cada una de las tablas de datos corresponden a un valor obtenido de la tabulación de Roblee y Chiou presentada en el marco teórico para completar las curvas dinámicas con el criterio de continuar la tendencia adecuada.

#### 6.4.1.3 Curvas de Módulo de corte G vs Deformación Y

Tabla 34. Normalización módulo de corte - Estrato 1

ESTRATO 1								
Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	Yr	A	2B	H(Y)	Gmod	G/Gmax
1								0.092
0,0257	14,621195	0,05	0,0035	0,66	1,18	0,94166749	31,2097247	0,11093402
0,0124	30,461665	0,10	0,0035	0,66	1,18	0,87474416	50,2413003	0,17858117
0,0041	43,2313	0,14	0,0035	0,66	1,18	0,66942505	108,629704	0,38612098
0,0018	47,6986	0,16	0,0035	0,66	1,18	0,46015263	168,142345	0,59765685
0,0014	103,8654	0,35	0,0035	0,66	1,18	0,40205434	184,664267	0,65638352
0,00010	299,00	1,00	0,0035	0,66	1,18	0,06211458	281,33593	1

Fuente: Autoría propia.

Tabla 35. Normalización módulo de corte - Estrato 2

ESTRATO 2								
Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	Yr	A	2B	H(Y)	Gmod	G/Gmax
<b>1</b>								<b>0,104</b>
0,018	26,433	0,07	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,92793238</b>	<b>50,8186126</b>	<b>0,14863132</b>
0,013	31,500	0,09	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,90106241</b>	<b>59,9105149</b>	<b>0,17522278</b>
0,009	38,067	0,10	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,84959567</b>	<b>77,3251468</b>	<b>0,22615609</b>
0,004	52,433	0,14	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,71740523</b>	<b>122,053983</b>	<b>0,35697638</b>
0,002	67,267	0,18	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,49909266</b>	<b>195,92368</b>	<b>0,57302617</b>
0,0001	364,800	1,00	0,0032	<b>0,64</b>	<b>1,21</b>	<b>0,06764695</b>	<b>341,910529</b>	<b>1</b>

Fuente: Autoría propia.

Tabla 36. Normalización módulo de corte - Estrato 3

ESTRATO 3								
Y	G (Kg/cm <sup>2</sup> )	G/Gmax	Yr	A	2B	H(Y)	Gmod	G/Gmax
<b>3,16</b>								<b>0.041</b>
0,024	16,094	0,01	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,94328068</b>	<b>82,5696325</b>	<b>0,07770466</b>
0,012	28,604	0,02	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,88502074</b>	<b>150,850618</b>	<b>0,14196256</b>
0,005	37,028	0,03	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,76688568</b>	<b>289,305584</b>	<b>0,27225981</b>
0,002	58,502	0,05	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,6108432</b>	<b>472,188267</b>	<b>0,44436712</b>
0,000	131,519	0,11	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,27921779</b>	<b>860,855146</b>	<b>0,81013389</b>
0,000	1188,100	1,00	0,0029	<b>0,61</b>	<b>1,08</b>	<b>0,10707415</b>	<b>1062,60849</b>	<b>1</b>

Fuente: Autoría propia

Figura 50. Gráfica comparativa curvas de degradación de módulo de corte Av. Boyacá con Av. Mutis



Fuente: Autoría propia

En las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas para la zona de estudio, se puede observar que la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de deformaciones intermedias y grandes, (aproximadamente  $10^{-3}$  % a  $10^{-2}$  %). Lo anterior es congruente con la curva reportada en la microzonificación sísmica, para las arcillas típicas de Bogotá, pero sin dejar de tener en cuenta que para las arcillas de la zona de estudio el módulo de rigidez se empieza a degradar a partir de un porcentaje de deformación inferior a la curva de referencia, escenario similar al presentado en la Av. Longitudinal de Occidente con Avenida Américas.

#### 6.4.1.4 Curvas de Amortiguamiento $\beta$ vs Deformación $\gamma$

Tabla 37. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 1

ESTRATO 1								
$\gamma$	$\beta$	$\beta$ (Norm)	Yr	A	2B	H( $\gamma$ )	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>3,16</b>								<b>23,61</b>
0,0257	0,232	23,2	0,0035	0,655	1,18	0,94209635	0,21914539	21,914539
0,0124	0,2055	20,55	0,0035	0,655	1,18	0,87563144	0,20439018	20,439018
0,0041	0,2025	20,25	0,0035	0,655	1,18	0,67146348	0,15906489	15,9064894
0,0018	0,1265	12,65	0,0035	0,655	1,18	0,46286643	0,11275635	11,2756347
0,0014	0,061	6,1	0,0035	0,655	1,18	0,40483924	0,09987431	9,98743108
0,00035	0,01	1	0,0035	0,655	1,18	0,16177095	0,04591315	4,59131501

Fuente: Autoría propia

Tabla 38. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 2

ESTRATO 2								
$\gamma$	$\beta$	$\beta$ (Norm)	Yr	A	2B	H( $\gamma$ )	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>3,16</b>								<b>23,61</b>
0,0252	0,24666667	24,67	0,0032	0,64	1,21	0,95055433	0,23496453	23,4964525
0,0115	0,20066667	20,07	0,0032	0,64	1,21	0,88388475	0,21918606	21,9186056
0,0044	0,17033333	17,03	0,0032	0,64	1,21	0,71689325	0,17966474	17,9664735
0,0021	0,11766667	11,77	0,0032	0,64	1,21	0,53445868	0,13648855	13,6488555
0,0005	0,042	4,20	0,0032	0,64	1,21	0,21694688	0,0613441	6,1344096
0,0004	0,01	1,00	0,0032	0,64	1,21	0,17268909	0,05086975	5,08697525

Fuente: Autoría propia

Tabla 39. Normalización Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación - Estrato 3

ESTRATO 3								
$\gamma$	$\beta$	$\beta$ (Norm)	$\gamma_r$	A	2B	H( $\gamma$ )	$\beta_{mod}$	$\beta$ (Norm)
<b>3,16</b>								<b>23,11</b>
0,0244	0,24	24,00	0,0029	0,61	1,08	0,94328068	0,22695456	22,6954556
0,0117	0,165	16,50	0,0029	0,61	1,08	0,88502074	0,21355477	21,3554769
0,0051	0,145	14,50	0,0029	0,61	1,08	0,76688568	0,18638371	18,6383706
0,0024	0,0835	8,35	0,0029	0,61	1,08	0,6108432	0,15049394	15,0493935
0,0005	0,0375	3,75	0,0029	0,61	1,08	0,27921779	0,07422009	7,42200919
0,0004	0,01	1,00	0,0029	0,61	1,08	0,2340431	0,06382991	6,38299119

Fuente: Autoría propia

Figura 51. Gráfica comparativa curvas Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación Av. Boyacá con Av. Mutis



Fuente: Autoría propia

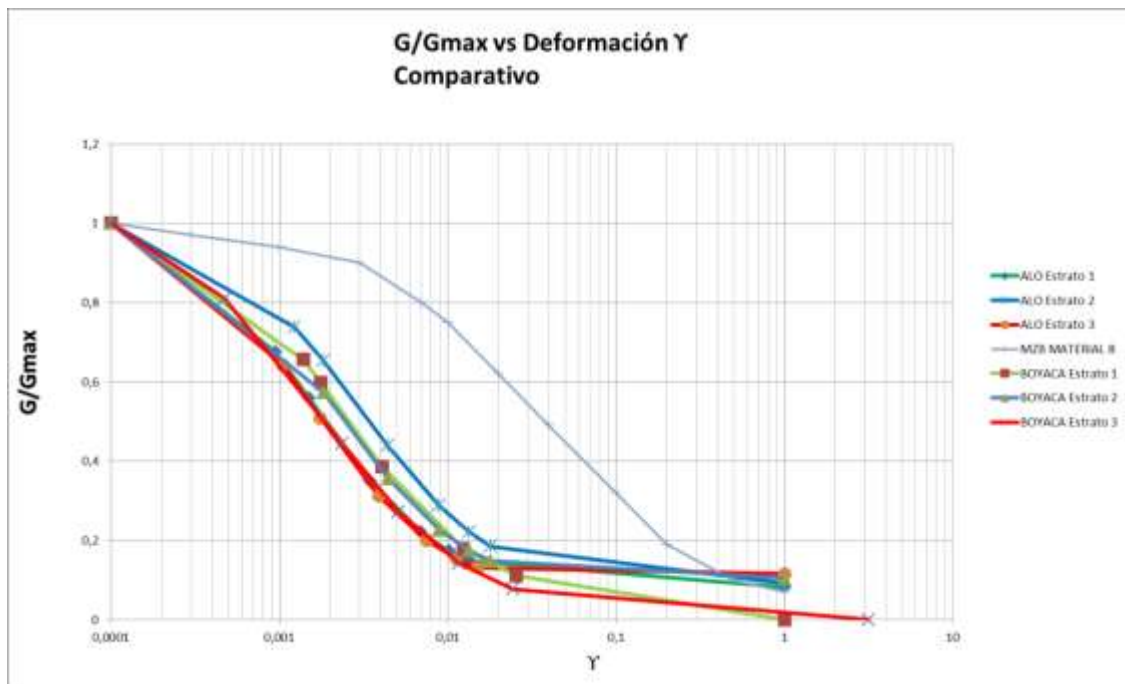
En las curvas de amortiguamiento vs deformación obtenidas para la zona de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis, se observa que difiere de la curva reportada en la microzonificación sísmica para las arcillas típicas de Bogotá, ya que para un rango de deformación aproximado de  $10^{-2}$  % a 10-1%, el amortiguamiento alcanza valores en un

rango de 21% a 23% y en la curva de la microzonificación sísmica para este mismo intervalo de deformación entre 5 y 10%.

#### 6.4.2 Comparación curvas dinámicas Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas y Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis en la ciudad de Bogotá.

A continuación se presentan las curvas dinámicas obtenidas por el modelo tipo Masing para los dos sitios mencionados de la Ciudad de Bogotá, y en las cuales se evidencia la similitud geotécnica de estas dos zonas.

Figura 52. Comparación Módulo cortante vs Deformación  $\gamma$



Fuente: Autoría propia

En la gráfica anterior se puede observar que los materiales presentes en la Av. Longitudinal de Occidente y los de la Av Boyacá con Av. Mutis presentan similar resistencia al corte en el rango de deformaciones intermedias ( $10^{-3}$  a  $10^{-1}$ ), lo que indica que son zonas similares geotécnicamente.

Figura 53. Comparación Amortiguamiento  $\beta$  vs Deformación  $\gamma$



Fuente: Autoría propia

En la gráfica anterior se puede observar que la capacidad de disipación de energía de los materiales presentes en la Av. Longitudinal de Occidente y los de la Av. Boyacá con Mutis aumenta considerablemente en el rango de deformaciones intermedias (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-1}$  %), lo cual indica que son zonas geotécnicamente similares.

### 6.4.3 Depósitos de Arcillas de la Ciudad de México

A continuación se presentan las curvas dinámicas de unas muestras de arcillas lacustres y arcillas marinas pertenecientes a la Ciudad de México, las cuales son obtenidas aplicando el modelo tipo Masing, el cual ha sido utilizado en la presente investigación para obtener las curvas correspondientes a las arcillas presentes en la ciudad de Bogotá.

Es importante aclarar que las curvas dinámicas planteadas para las arcillas de la ciudad de México, son obtenidas bajo una modificación realizada al modelo tipo Masing, por medio de un proceso de ajuste a los datos experimentales mediante una regresión no lineal por

mínimos cuadrados, y además plantea que el parámetro A no depende del índice de plasticidad del material.

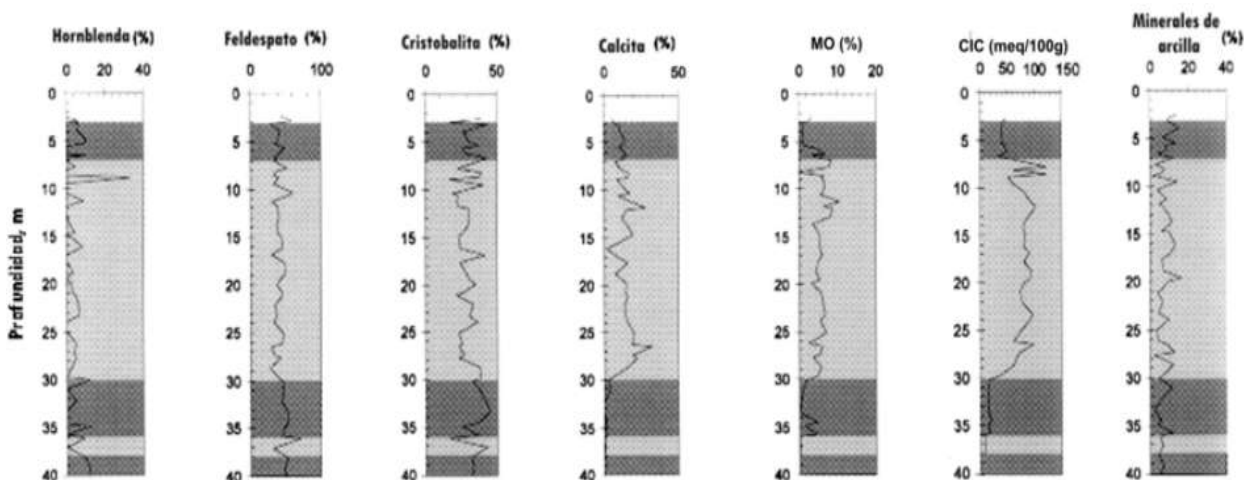
#### 6.4.3.1 Características de los depósitos lacustres de la Ciudad de México

Tabla 40. Estratigrafía general de la ciudad de México

Formación	Profundidad (m)	Espesor (m)	w (%)	Litología
Azteca	N/D	N/D	N/D	N/D
Teotihuacan	N/D	N/D	N/D	Relleno
Zacatenco	N/D	N/D	N/D	N/D
Totalzingo	5 - 6	1	50 - 100	Ceniza alterada y arena
Barrilaco	6 - 7	1	100	Arcilla y arena con pómez y caliche.
Becerra	7 - 8.3	1.3	60 -100	Arena, arcilla y arena pumítica
Tacubaya	8.3 - 33	24.7	200-500	Limo arcilloso, ceniza alterada e inalterada, microfósiles
Tarango	33 - 80	47	30 -300	Depósitos aluviales y lacustres de grava, arena y limo arcillosos

Fuente: DIAZ Jorge. Los suelos lacustres de la ciudad de México. En: Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 115

Figura 54. Perfiles de datos mineralógicos de la zona lacustre de la ciudad de México.

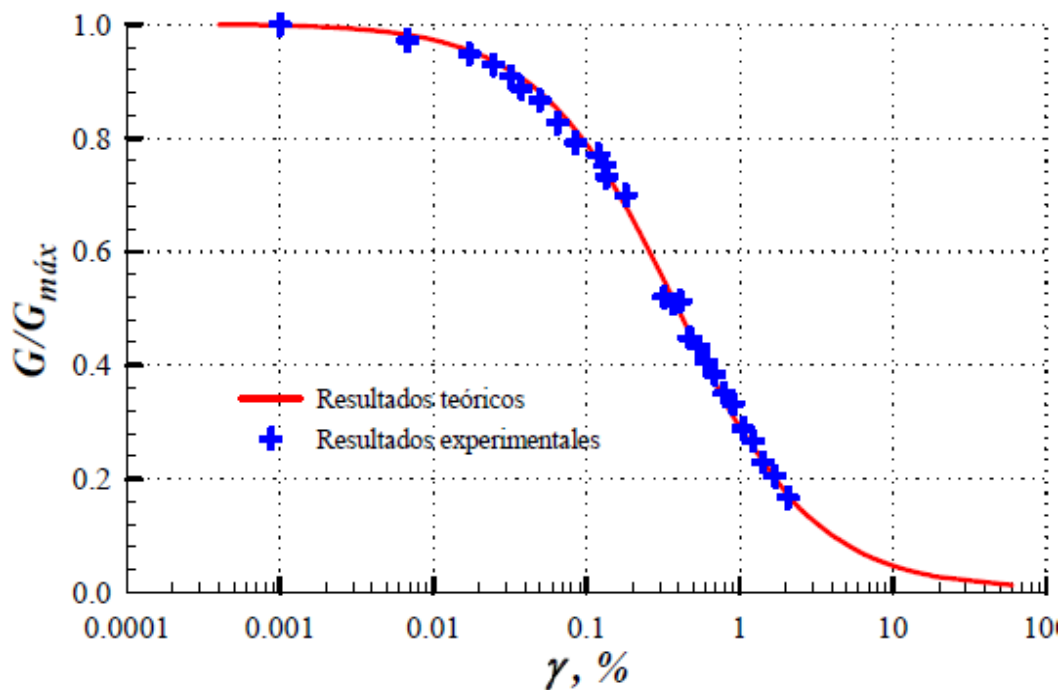


Fuente: DIAZ Jorge. Los suelos lacustres de la ciudad de México. En: Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 115.

- Se tienen varias lentes de arena inter-estratificadas.
- El contenido de agua se incrementa con el decrecimiento de la profundidad, con un valor de aproximadamente 220% a 30 m. y alcanzado un máximo de 420% a 7 m.
- Los promedios de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad son 338, 80 y 308%, respectivamente.
- La  $V_s$  es casi constante con la profundidad, con un promedio de 81 m/s.<sup>26</sup>

#### 6.4.3.2 Curvas dinámicas arcillas de la Ciudad de México

Figura 55. Curva de degradación de módulo de corte para un depósito de arcilla de la ciudad de México.

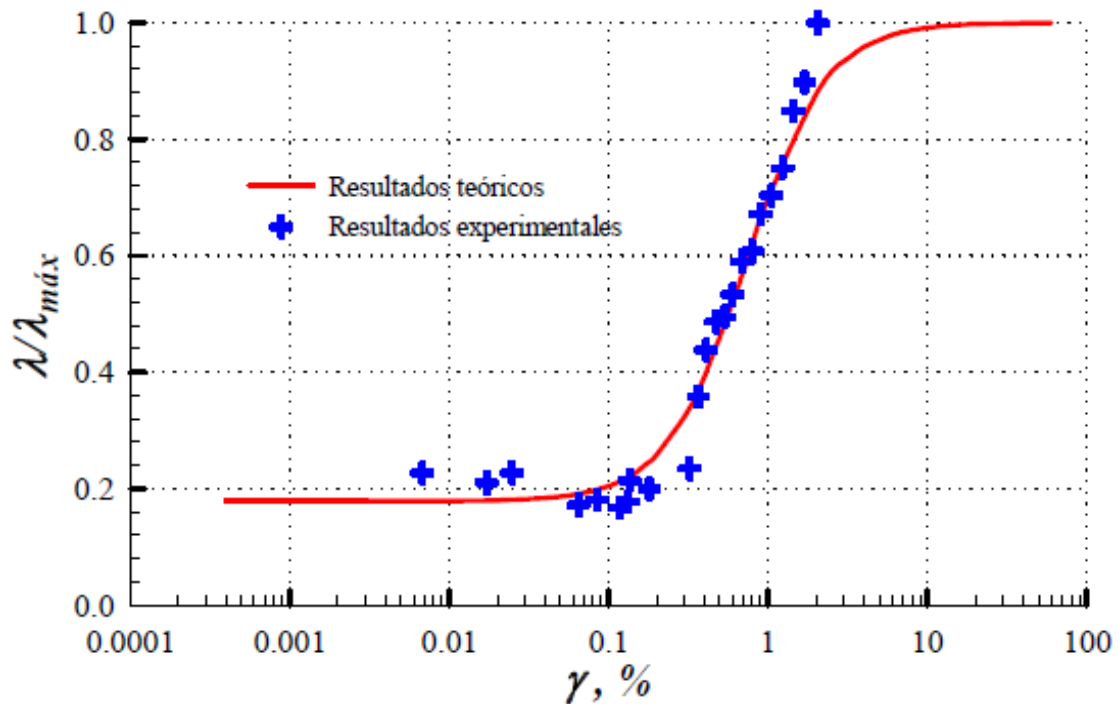


Fuente: GONZALEZ Claudia. Estimación propiedades dinámicas de arcillas. En: Revista de Ingeniería Sísmica, 2011, No. 84 1-23.

<sup>26</sup> DIAZ Jorge. Los suelos lacustres de la ciudad de México. En: Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 115.

En la curva de degradación de módulo de corte correspondiente a un depósito de arcilla típica de la Ciudad de México, se puede observar que la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, (aproximadamente  $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), resultado congruente con las curvas propuestas por los autores Roblee y Chiou para suelos plásticos.

Figura 56. Curva de Amortiguamiento vs Deformación para un depósito de arcilla de la ciudad de México

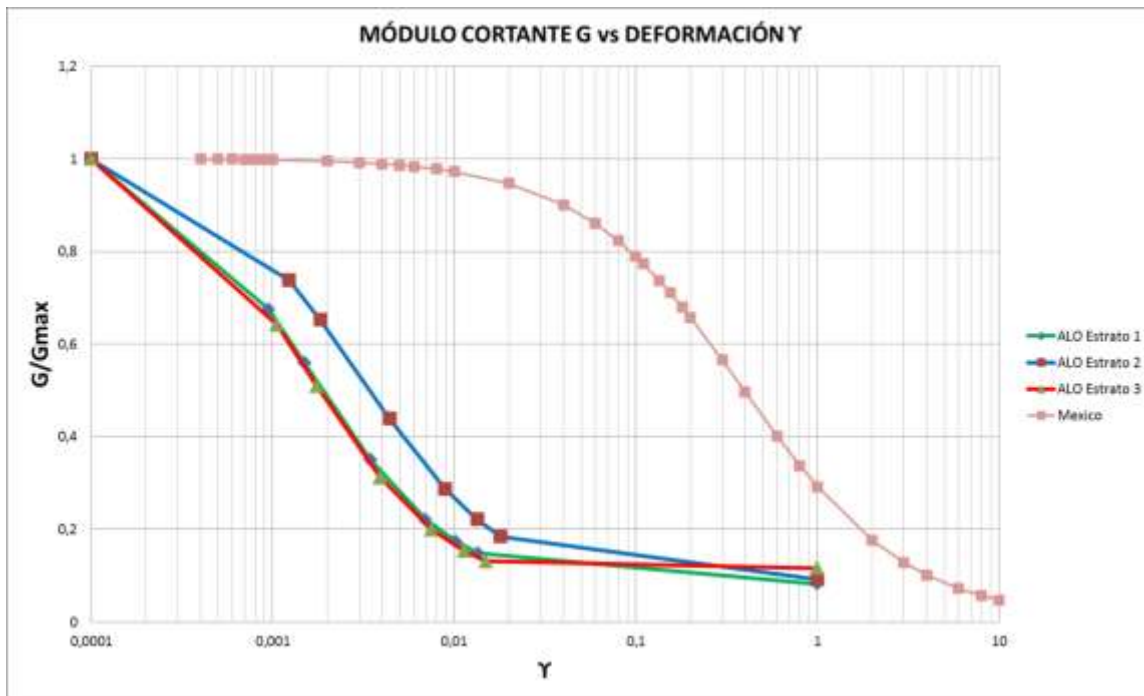


Fuente: GONZALEZ Claudia. Estimación propiedades dinámicas de arcillas. En: Revista de Ingeniería Sísmica, 2011, No. 84 1-23.

En la curva de amortiguamiento vs deformación correspondiente a un depósito de arcilla típica de la Ciudad de México, se puede observar que la máxima capacidad para disipar energía en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, (aproximadamente  $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), resultado congruente con las curvas propuestas por los autores Roblee y Chiou para suelos plásticos.

#### 6.4.4 Comparación curvas dinámicas Av. Longitudinal de Occidente con Ciudad de México.

Figura 57. Curva de degradación de módulo de corte



Fuente: Autoría propia.

En la curva de degradación de módulo de corte correspondiente a un depósito de arcilla típica de la Ciudad de México, se puede observar que la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, (aproximadamente  $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), y para las arcillas presentes en la Av. Longitudinal de Occidente en la Ciudad de Bogotá, la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de deformaciones pequeñas e intermedias, (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-2}$  %).

Figura 58. Gráfica Amortiguamiento vs Deformación



Fuente: Autoría propia.

En la gráfica anterior, se puede observar que para las arcillas de Ciudad de México la máxima capacidad para disipar energía se presenta en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, (aproximadamente  $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), y para las arcillas presentes en la Av. Longitudinal de Occidente en la Ciudad de Bogotá, la máxima capacidad para disipar energía se presenta en el rango de deformaciones pequeñas e intermedias, (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-2}$  %).

## 7 CONCLUSIONES

- En la selección de información realizada en la primera fase de la investigación, se observó que el tipo de suelo predominante en el sitio de estudio son las arcillas limosas, pero es importante resaltar la presencia de un estrato de 4 metros de arena fina limosa y pequeños estratos de limo arcilloso. Lo anterior es consistente con la información reportada en la Microzonificación sísmica de Bogotá para la zona de estudio, que corresponde según el mapa de zonificación de respuesta sísmica a la zona lacustre.
- Los valores de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) obtenidos a partir del análisis de los resultados del ensayo de Down Hole, son consistentes con los valores típicos de la zona reportados, en la Microzonificación sísmica de Bogotá, con valores promedio de  $V_s < 175$  m/s, correspondiente a la zona lacustre.
- En las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas para la zona de estudio, se evidencia la influencia del índice de plasticidad en el comportamiento dinámico de las arcillas. Tomando como referencia el estrato 2, en el cual el valor promedio del índice de plasticidad es de 107.17%, se observa que el material tiene mayor resistencia al corte que los estratos 1 y 3, los cuales tienen un índice de plasticidad de 22.90% y 17.56% respectivamente, lo cual indica que el índice de plasticidad es directamente proporcional a la resistencia al corte del suelo.
- En las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas para cada uno de los estratos de la zona de estudio se puede observar que la mayor degradación del módulo se presenta en el intervalo de intermedias y grandes deformaciones ( $10^{-3}$  y  $10^{-2}$ ), lo cual difiere de la curva teórica propuesta por Dobry y Vucetic las cuales presentan la mayor degradación de módulo en el intervalo de grandes deformaciones el estado de falla ( $10^{-2}$  a 1).
- En las curvas de amortiguamiento obtenidas para cada uno de los estratos de la zona de estudio se observa como la capacidad de disipación de energía aumenta considerablemente en el rango de las deformaciones intermedias (10-4 % a 10-1 %),

lo cual difiere de las curvas propuestas por Dobry y Vucetic en donde la razón de amortiguamiento aumenta considerablemente en el rango de las grandes deformaciones y el estado de falla (10-2% a 1%).

- Comparando los parámetros dinámicos obtenidos de los suelos de la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas, con los de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis en la ciudad de Bogotá, y teniendo en cuenta el mapa de zonificación de respuesta sísmica de Bogotá y la clasificación de suelo sugerida por la NSR-10 se obtiene para las dos zonas un suelo tipo E (arcillas blandas) hasta profundidades aproximadas de 40m y un suelo tipo D (suelo rígido) para profundidades mayores a 40m a partir de lo anterior se demuestra que las dos zonas son geotécnicamente similares.
- Los materiales presentes en la Av. Longitudinal de Occidente y los de la Av Boyacá con Av. Mutis presentan mayor degradación del módulo de corte en el rango de deformaciones intermedias y grandes, (aproximadamente  $10^{-3}$  % a  $10^{-2}$  %)y la capacidad de disipación de energía también aumenta considerablemente en el rango de deformaciones intermedias y grandes (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-1}$  %) lo que indica que son zonas geotécnicamente similares.
- La geometría de las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas para la zona de estudio es congruente con la curva reportada en la microzonificación sísmica para las arcillas típicas de Bogotá, pero es importante tener en cuenta que para las arcillas de la zona de estudio el módulo de rigidez se empieza a degradar a partir de un porcentaje de deformación inferior ( $10^{-4}$ ) que en la curva reportada en la microzonificación.
- Comparando las curvas de degradación de módulo de corte obtenidas de las arcillas típicas de la Ciudad de México, con las obtenidas para las arcillas de la ciudad de Bogotá, se puede observar que en México la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, ( $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), y para las arcillas presentes en la Av. Longitudinal de Occidente en la Ciudad de Bogotá, la mayor degradación del módulo se presenta en el rango de

deformaciones pequeñas e intermedias, (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-2}$  %). Lo anterior es debido a la incidencia del índice de plasticidad, ya que en México se presentan índices del orden de 300%, lo cual se atribuye a la presencia de material de origen volcánico.

- A partir de la comparación de las curvas de amortiguamiento de las arcillas de Ciudad de México y las de la ciudad de Bogotá se puede observar que para las arcillas de Ciudad de México la máxima capacidad para disipar energía se presenta en el rango de las grandes deformaciones y de la zona de falla, (aproximadamente  $10^{-2}$  % a  $10^1$  %), y para las arcillas presentes en la Av. Longitudinal de Occidente en la Ciudad de Bogotá, la máxima capacidad para disipar energía se presenta en el rango de deformaciones pequeñas e intermedias, (aproximadamente  $10^{-4}$  % a  $10^{-2}$  %), lo anterior también se atribuye a los altos índices de plasticidad que presentan los materiales de Ciudad de México.

## 8 RECOMENDACIONES

- Para obtener parámetros dinámicos confiables y a su vez poder modelar las propiedades dinámicas de un suelo, es recomendable realizar el mayor número de pruebas de campo y laboratorio, especialmente ensayos de triaxial cíclico a diferentes profundidades, con el fin de tener la mayor información posible del comportamiento dinámico del suelo en el rango correspondiente a las grandes deformaciones.
- Es necesario realizar una caracterización dinámica a los suelos del lugar específico en donde se planeen construir obras de infraestructura, ya que cada sitio presenta características propias que difieren de las curvas teóricas planteadas, como se pudo observar en la presente investigación.
- Se recomienda utilizar el modelo tipo Masing para normalizar las curvas dinámicas de materiales arcillosos, ya que este modelo se basa principalmente en el índice de plasticidad de los materiales, parámetro que se puede obtener con ensayos básicos de laboratorio.
- Se recomienda en futuras investigaciones plantear las modificaciones pertinentes al modelo tipo Masing, teniendo en cuenta no solo el índice de plasticidad si no también el índice de liquidez del material.
- Se recomienda realizar análisis comparativo de respuesta local en el sector de estudio, por métodos unidimensionales o microtemores.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALFARO, Andres. Correlación entre el Valor N del Ensayo de Penetración Estándar y Velocidad de Ondas de Corte para Arcillas en Bogotá – Colombia. En: Revista Épsilon, Enero - Junio de 2007, No. 8.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. NSR-10 Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá. Colombia. 2010. Título H.
- ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones. Bogotá. Colombia. 2010.
- CEI S.A. Revisión y actualización de los estudios y diseños de la Avenida Longitudinal de Occidente entre el Río Bogotá y la Calle 13. IDU. Bogotá D.C. 2006. CONTRATO No. 042-2006
- CEPEDA, Diana. Caracterización dinámica de suelos; estado del arte e implementación del laboratorio. Trabajo de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. 2010.
- DIAZ, Jorge. Caracterización dinámica de los suelos – ensayos de campo y laboratorio. En: Curso de actualización en ingeniería sísmica y dinámica de suelos, Universidad Nacional Autónoma de México.
- DIAZ Jorge. Los suelos lacustres de la ciudad de México. En: Rev. Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2) 115
- GONZALEZ Claudia. Estimación propiedades dinámicas de arcillas. En: Revista de Ingeniería Sísmica, 2011, No. 84 1-23.
- GONZALEZ Claudia. Modelación de las propiedades dinámicas de arcillas marinas. Tesis para optar por el grado de: Maestra en Ingeniería. México D.F: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad Ingeniería. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. 2005.
- LAZCANO, Salvador. Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie. México. 2007.

- RAMÍREZ, Oscar. Inventario de casos de licuación durante eventos sísmicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia: 2004.
- SARRIA, Alberto. Ingeniería Sísmica. Bogotá, Universidad de Los Andes, 1990.
- SARRIA, Alberto, Métodos Geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil. Bogotá D.C: Ediciones Uniandes, 1996.
- SAUTER, Franz. Introducción a la sismología. Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1989.
- SUAREZ, Jaime. Sísmica de los suelos [diapositivas].[www.erosión.com.co](http://www.erosión.com.co). 88 diapositivas, color.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.** Resultados de ensayos estáticos y dinámicos de la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas. Instituto de Desarrollo Urbano. (Primera parte).

**ANEXO 2.** Resultados de ensayos estáticos y dinámicos de la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas. Instituto de Desarrollo Urbano. (Segunda parte).

**ANEXO 3.** Resultados SPT (Tabla 10, 5.6) de la Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas. Instituto de Desarrollo Urbano.

**ANEXO 4.** Resultados de ensayos estáticos y dinámicos de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis. Instituto de Desarrollo Urbano. (Primera parte).

**ANEXO 5.** Resultados de ensayos estáticos y dinámicos de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis. Instituto de Desarrollo Urbano. (Segunda parte).

**ANEXO 6.** Resultados de ensayos estáticos y dinámicos de la Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis. Instituto de Desarrollo Urbano. (Tercera parte).

**ANEXO 7.** Memorias de Cálculo (archivo excel) Av. Longitudinal de Occidente con Av. Américas.

**ANEXO 8.** Memorias de Cálculo (archivo excel) Av. Boyacá con Av. José Celestino Mutis y México.