

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura de la Zona de  
Expansión Oriental de Ibagué**

**Leidy Camila Hernández Carrillo**

**Bogotá, D.C., 15 de diciembre de 2023**



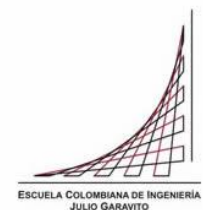
# **Zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia**

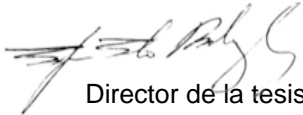
**Edgar Eduardo Rodríguez Granados**

**Director**

**Bogotá, D.C., 15 de diciembre de 2023**



La tesis de maestría titulada “Zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué”, presentada por Leidy Camila Hernández Carrillo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.



Director de la tesis

**Edgar Eduardo Rodríguez Granados**

Jurado

**Javier Fernando Camacho Tauta**

Jurado

**Edgard Robert Barbosa Cruz**

Bogotá, D.C., 15 de diciembre de 2023

A Dios por ser la roca sobre la cual cimenté mi vida, por guiarme y darme la fortaleza, sabiduría y valentía para alcanzar mis más grandes sueños y anhelos.

A mi madre María Dominarda Carrillo y padre Arturo Hernández Ávila por su apoyo incondicional, por cada sacrificio y por formar la persona que soy hoy en día, sin ustedes nada hubiese sido posible; los amo y agradezco a Dios por tener el privilegio de ser su hija.

A mis hermanos Juan Sebastián y Bryan Daniel Carrillo, por ser mi vida entera, mi mayor inspiración y el principal motivo para seguir adelante a pesar de las dificultades que se puedan encontrar en el camino.

A mis hermanos Geidy Katherine Hernández C, Andrés Felipe Hernández C. y Piedad Carrillo por ser mis amigos fieles, acompañarme en cada instante y por ayudarme a enfocarme en los instantes donde sentí perder el rumbo.

A mis dos más grandes ángeles, mis hermanos Sandra Patricia Carrillo y Edinson Rojas Carrillo, que junto con Dios me guían y me acompañan siempre.

## Agradecimientos

Agradezco infinitamente al Ing. Edgar Eduardo Rodríguez Granados, por su paciencia, dedicación, apoyo y orientación en el desarrollo de mi trabajo de grado, por aceptar ser mi director aun así con sus múltiples compromisos, siempre estuvo ahí para brindarme su colaboración, asesoría y orientación, Dios lo bendiga.

Así mismo, agradezco a cada uno de mis docentes de maestría por sus conocimientos brindados, por ayudar a consolidar mi amor por la ingeniería civil en especial por la Geotecnia; a mis jurados Ing. Javier Fernando Camacho Tauta e Ing. Edgard Robert Barbosa Cruz, por su cariño, comprensión, profesionalismo y ante todo por su excelente calidad humana, Dios contribuya en bendiciones cada palabra, conocimiento y consejo dado.

Por último, doy mis agradecimientos a la Universidad de Ibagué por ser mi alma mater como ingeniería civil, a la Universidad Cooperativa de Colombia Campus Ibagué-Espinal, por abrirme sus puertas desde hace más de 8 años y permitirme aprender y entregar a cientos de ingenieros en formación, mis conocimientos como Docente en el área de la Geotecnia; y a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por haberme formado como una Ingeniera Geotecnista Integral.

Gracias a todos.

## Resumen

En el presente documento, se establece la zonificación por interacción sísmica suelo-estructura de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué, sobre el perímetro comprendido entre la carrera quinta y la Avenida Mirolindo y las calles 60 y 145, de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Ibagué, Tolima aprobado según en el Decreto No. 0823 de 2014 de la Secretaría de Planeación Municipal de Ibagué. Se estableció la caracterización geotécnica en la cual se determinaron propiedades mecánicas como pesos unitarios, espesores de estratos, índices de plasticidad, granulometrías, entre otros y propiedades dinámicas como velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), periodo de vibración de los suelos ( $T_s$ ), curvas dinámicas de degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación de amortiguamiento ( $\beta\%$ ).

Paralelamente, se realizó la caracterización estructural en la cual se obtuvieron propiedades como numero de niveles, numero de sótanos, sistema estructural de resistencia sísmica, periodo fundamental de vibración aproximado ( $T_a$ ), tipo de cimentación y uso de las edificaciones que predominan sobre la zona de análisis. Con lo anterior, se logró establecer mapas de periodos de vibración de los depósitos y caracterización estructural y geotécnica.

Ahora bien, de manera documental se estableció la desagregación de la amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué y a la vez, se seleccionaron los eventos sísmicos que mejor la representan, lo que permitió identificar de manera general los sitios dentro del área de análisis que pueden ser susceptibles a amplificaciones y/o fenómenos de resonancia sísmica. Lo anterior fue verificado mediante análisis de respuesta sísmica lineal equivalente, haciendo uso del software Deepsoil V7.

Por último, se determinó la interacción sísmica suelo estructura, por medio de las modelaciones de los sitios de análisis abarcando 300m de longitud en un espacio bidimensional, haciendo uso del software de elementos finitos Plaxis 2D V20, implementando el modelo Hardening Soil con pequeñas deformaciones. Se conocieron las aceleraciones máximas espectrales, amplificaciones sísmicas y desplazamientos horizontales desde la roca hasta la altura máxima de cada edificación de análisis. Lo que permitió la proyección de la zonificación por interacción sísmica suelo estructura de la zona de expansión oriental de Ibagué.

**Palabras Clave:** Interacción sísmica suelo estructura, Análisis de respuesta sísmica, Método elementos finitos, Dinámica de suelos, Caracterización Geotécnica, Caracterización estructural, desagregación de la amenaza.

## Abstract

In this document, the seismic soil-structure interaction zoning was conducted in the Eastern Expansion Zone of Ibagué, delimited by Fifth Avenue and Mirolindo Avenue, as well as 60th and 145th streets, in accordance with the Territorial Planning Plan of the City of Ibagué, Tolima, approved by Decree No. 0823 of 2014 from the Municipal Planning Secretariat of Ibagué. Geotechnical characterization was performed, determining mechanical and dynamic properties of the soil, including unit weights, stratum thicknesses, plasticity indexes, size distributions, shear wave velocity ( $V_s$ ), soil vibration period ( $T_s$ ), dynamic degradation curves of the shear modulus ( $G/G_{max}$ ), and damping variation ( $\beta\%$ ).

Simultaneously, structural characterization was carried out, obtaining properties such as the number of levels, number of basements, seismic resistance structural system, approximate fundamental vibration period ( $T_a$ ), type of foundation, and use of predominant buildings in the analysis area. With this information, maps of vibration periods of deposits and structural and Geotechnical characterization were established. Seismic threat disaggregation for the city of Ibagué was documented, and seismic events representing it were selected. This allowed for the general identification of sites within the analysis area that may be susceptible to amplifications and/or seismic resonance phenomena. This was verified through linear equivalent seismic response analysis, using Deepsoil V7 software.

Finally, seismic soil-structure interaction was determined by modeling analysis sites covering a 300 m length in a two-dimensional space, using Plaxis 2D V20 finite element software, implementing the Hardening Soil model with small deformations. In order to know the maximum spectral accelerations, seismic amplifications and horizontal displacements from the rock to the maximum height of each analysis building. It allowed the projection of zoning by seismic soil-structure interaction of the eastern expansion zone of Ibagué.

**Keywords:** Seismic soil-structure interaction, Seismic response analysis, Finite element method, Soil dynamics, Geotechnical characterization, Structural characterization, Threat disaggregation.

## Índice General

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>4</b>
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
<b>Capítulo I _ Marco teórico .....</b>	<b>5</b>
1.1. Interacción sísmica, suelo y estructura .....	5
1.2. Periodos de vibración.....	8
<b>Capitulo II _ Geología Regional y Local.....</b>	<b>11</b>
2.1. Geología Regional.....	11
2.1.1. Periodo Precámbrico .....	12
2.1.2. Periodo Paleozoico .....	13
2.1.3. Periodo Mesozoico .....	13
2.1.4. Periodo Cenozoico .....	13
2.2. Geología Local .....	15
2.2.4. Neises y anfíbolitas de Tierradentro (PCAn/PCAA) .....	15
2.2.5. Batolito de Ibagué (Jcdi).....	15
2.2.6. Abanico de Ibagué (Qai).....	16
2.3. Tectónica y Neotectónica .....	23
2.3.4. Falla de Ibagué.....	25
2.3.5. Sistema Romeral.....	26
2.3.6. Falla Buenos Aires .....	26
2.3.7. Falla de Armenia .....	26
2.3.8. Falla de Córdoba.....	26
2.3.9. Falla de Honda .....	26
2.3.10. Falla Palestina.....	27
2.3.11. Falla de Cucuana .....	27



2.3.12. Falla Pan de Azúcar .....	27
<b>Capitulo III _ Caracterización Estructural de la Zona .....</b>	<b>28</b>
3.1. Edificaciones por categorías .....	34
3.2. Propiedades físicas y estructurales.....	36
3.2.1. Barrios.....	37
3.2.2. Numero de niveles .....	38
3.2.3. Número de Sótanos .....	38
3.2.4. Sistema estructural .....	39
3.2.5. Tipo de Cimentación .....	40
3.2.6. Uso.....	42
3.3. Periodo fundamental de vibración.....	42
3.4. Clasificación de las tipologías estructurales.....	46
<b>Capitulo IV _ Caracterización Geotécnica de la Zona .....</b>	<b>48</b>
4.1. Recopilación de Información Existente .....	48
4.2. Propiedades Geomecánicas de los suelos .....	52
4.2.1. Distribución Granulométrica.....	52
4.2.2. Límites de Consistencia y Plasticidad .....	54
4.2.3. Numero de Golpes de SPT vs Profundidad .....	55
4.3. Propiedades dinámicas de los suelos .....	56
4.3.1. Ensayo de triaxial cíclico .....	57
4.3.2. Ensayo de Columna Resonante.....	61
4.3.3. Ensayo de velocidad de onda “Bender Elements” .....	62
4.3.4. Modelo de comportamiento dinámico de los suelos.....	63
4.3.5. Curvas dinámicas de degradación del módulo de corte y variación del amortiguamiento.....	67
4.4. Clasificación Sísmica de los Suelos.....	68
4.4.1. Velocidad de Onda de Corte $V_s30$ .....	68
4.4.2. Periodo de vibración predominante del sitio.....	71

<b>Capítulo V - Amenaza Sísmica</b> .....	<b>74</b>
5.1. Sísmicidad Asociada .....	74
5.2. Desagregación de la Amenaza Sísmica.....	78
5.3. Comparación de metodologías .....	95
5.4. Selección y procesamiento de eventos sísmicos .....	96
<b>Capítulo VI - Zonificación Sísmica</b> .....	<b>104</b>
<b>Capítulo VII - Análisis de Respuesta Sísmica</b> .....	<b>118</b>
7.1. Sitio de análisis 1 .....	120
7.2. Sitio de análisis 2 .....	129
<b>Capítulo VIII - Interacción Sísmica Suelo-Estructura</b> .....	<b>137</b>
8.1. Descripción y propiedades de las edificaciones.....	137
8.1.1. Propiedades de los materiales .....	143
8.1.2. Cargas.....	144
8.1.3. Determinación de pórticos bidimensionales .....	145
8.1.4. Coeficientes de amortiguamiento Rayleigh.....	147
8.2. Modelo constitutivo del suelo .....	149
8.2.1. Fundamento de la ley hiperbólica simple .....	151
8.2.2. Relación de modelo Hardening Soil Small con la teoría de Hardin y Drnevich .....	152
8.2.3. Propiedades estáticas y dinámicas de los suelos .....	155
8.3. Descripción de los perfiles de suelos .....	157
8.3.1. Determinación de propiedades básicas de los suelos .....	158
8.3.2. Identificación de propiedades de resistencia de los suelos.....	161
8.3.3. Propiedades de rigidez de los suelos.....	161
8.4. Modelación en Plaxis 2D.....	164
8.4.1. Ventana grafica – Perfiles geotécnicos .....	165
<b>Capítulo IX - Análisis de Resultados</b> .....	<b>168</b>
9.1. Sitio de análisis No. 1 – Campo Libre .....	168
9.2. Sitio de análisis No. 2 – Campo Libre .....	173

9.3. Sitio de análisis No. 1 – Modelo suelo, sismo y estructura (Edificaciones de 2N y 3N) .....	177
9.4. Sitio de análisis No. 2 – Modelo suelo, sismo y estructura (Edificaciones de 2N y 5N) .....	182
9.5. Desplazamientos en elementos estructurales.....	188
9.6. Zonificación por interacción sísmica suelo estructura .....	190
<b>Capítulo X_ Resumen, limitaciones, conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>197</b>
10.1. Resumen.....	197
10.2. Limitaciones .....	200
10.3. Conclusiones .....	200
10.4. Recomendaciones .....	203
<b>Capítulo XI_ Referencias.....</b>	<b>205</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Densidad Poblacional por comuna .....	28
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de edificaciones .....	31
<b>Tabla 3.</b> Número de edificaciones aforadas .....	33
<b>Tabla 4.</b> Número de Barrios por comuna de la Ciudad de Ibagué.....	38
<b>Tabla 5.</b> Tipos de Sistemas Estructurales .....	39
<b>Tabla 6.</b> Tipo de uso vs No. de edificaciones .....	42
<b>Tabla 7.</b> Parámetros $C_t$ y $\alpha$ según sistema estructural .....	43
<b>Tabla 8.</b> Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Baja .....	44
<b>Tabla 9.</b> Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Media .....	45
<b>Tabla 10.</b> Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Alta .....	45
<b>Tabla 11.</b> Tipos de edificaciones predominantes según categoría de construcción .....	46
<b>Tabla 12.</b> Información General Microtremores .....	51
<b>Tabla 13.</b> Ensayo triaxial cíclico ICBF M4 .....	58
<b>Tabla 14.</b> Ensayo triaxial cíclico Polideportivo La Gaviota M2 .....	59
<b>Tabla 15.</b> Ensayo triaxial cíclico Polideportivo La Gaviota M6 .....	60
<b>Tabla 16.</b> Resultados de ensayos de velocidad de onda de corte .....	63
<b>Tabla 17.</b> Velocidad de Onda de corte equivalente Vs30 .....	69
<b>Tabla 18.</b> Periodo de vibración predominante del sitio .....	72
<b>Tabla 19.</b> Continuación Sismos Históricos 1644 – 2013 .....	74
<b>Tabla 20.</b> Sismos Regionales notables .....	78
<b>Tabla 21.</b> Desagregación de la amenaza, pares de magnitud-distancia por periodo de retorno..	95
<b>Tabla 22.</b> Aceleraciones espectrales en roca para diferentes periodos de retorno .....	95
<b>Tabla 23.</b> Pares de magnitud-distancia y Aceleración espectral en roca, tomados para la selección de los registros sísmicos .....	97
<b>Tabla 24.</b> Características de los eventos sísmicos seleccionados .....	98

<b>Tabla 25.</b> Características de los acelerogramas seleccionados .....	102
<b>Tabla 26.</b> Coordenadas perfiles geotécnicos .....	106
<b>Tabla 27.</b> Sectores con probabilidad de resonancia sísmica por ISSE .....	117
<b>Tabla 28.</b> Estaciones sobre la ciudad de Ibagué de la Red Nacional de Acelerogramas .....	118
<b>Tabla 29.</b> Sitios de análisis de respuesta sísmica .....	119
<b>Tabla 30.</b> Sitios de análisis de respuesta sísmica - Microzonificaciones sísmicas de Ibagué ....	120
<b>Tabla 31.</b> Perfil geotécnico sitio de análisis 1 .....	121
<b>Tabla 32.</b> Perfil geotécnico sitio de análisis 2 .....	129
<b>Tabla 33.</b> Relación periodos predominantes de vibración en roca y superficie .....	136
<b>Tabla 34.</b> Características generales de las edificaciones .....	137
<b>Tabla 35.</b> Dimensiones de los elementos estructurales de las edificaciones .....	143
<b>Tabla 36.</b> Características estructurales de las edificaciones .....	144
<b>Tabla 37.</b> Avalúo de cargas vivas y muertas .....	145
<b>Tabla 38.</b> Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos tipo viga de los pórticos simplificados .....	146
<b>Tabla 39.</b> Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos tipo columna de los pórticos simplificados .....	146
<b>Tabla 40.</b> Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos de cimentación de los pórticos simplificados .....	147
<b>Tabla 41.</b> Coeficientes tipo Rayleigh para los elementos estructurales .....	149
<b>Tabla 42.</b> Parámetros de resistencia del modelo HSS .....	155
<b>Tabla 43.</b> Propiedades básicas y avanzadas de rigidez del modelo HSS .....	157
<b>Tabla 44.</b> Perfil estratigráfico general del sitio de análisis 1 .....	157
<b>Tabla 45.</b> Perfil estratigráfico general del sitio de análisis 2 .....	158
<b>Tabla 46.</b> Pesos unitarios de los estratos de suelos .....	158
<b>Tabla 47.</b> Coeficiente de amortiguamiento Rayleigh – Sitio de análisis 1 .....	160
<b>Tabla 48.</b> Coeficiente de amortiguamiento Rayleigh – Sitio de análisis 2 .....	160

<b>Tabla 49.</b> <i>Parámetros de resistencia de los suelos – Sitio de análisis 1 y 2 .....</i>	161
<b>Tabla 50.</b> <i>Propiedades de rigidez básicas y avanzadas – sitios de análisis .....</i>	164
<b>Tabla 51.</b> <i>Aceleraciones espectrales en periodos 0s de distintos espectros de respuesta – sitio de análisis 1 .....</i>	169
<b>Tabla 52.</b> <i>Aceleraciones espectrales en periodos 0s de distintos espectros de respuesta – sitio de análisis 2 .....</i>	174
<b>Tabla 53.</b> <i>Aceleraciones espectrales y factores de amplificación por niveles de las edificaciones de 2 y 3 niveles– sitio de análisis 1 .....</i>	179
<b>Tabla 54.</b> <i>Desplazamientos horizontales del suelo, en el sitio de análisis 1 .....</i>	180
<b>Tabla 55.</b> <i>Aceleraciones espectrales y factores de amplificación por niveles de las edificaciones de 2 y 5 niveles – sitio de análisis 2 .....</i>	185
<b>Tabla 56.</b> <i>Desplazamientos horizontales del suelo, en el sitio de análisis 2 .....</i>	188
<b>Tabla 57.</b> <i>Desplazamientos horizontales en elementos estructurales con respecto a las derivadas por la NSR-10.....</i>	189
<b>Tabla 58.</b> <i>Categorización del Índice de Resonancia Sísmica (IRS) .....</i>	191
<b>Tabla 59.</b> <i>Categorización del Índice de Deriva Máxima (IDM) .....</i>	192
<b>Tabla 60.</b> <i>Categorización del riesgo por la edad de la edificación (Antigüedad) .....</i>	192
<b>Tabla 61.</b> <i>Categorización del Riesgo por Interacción Sísmica Suelo- Estructura (<math>R_{ISSE}</math>).....</i>	195
<b>Tabla 62.</b> <i>Discretización de la categoría del Riesgo por ISSE de acuerdo con el tipo de unidad de construcción .....</i>	195

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> <i>Perímetro de influencia directa del proyecto</i> .....	3
<b>Figura 2.</b> <i>Modificación del movimiento del campo libreo</i> .....	5
<b>Figura 3.</b> <i>Respuesta Dinámica del Subsuelo y Efectos de Sitio</i> .....	6
<b>Figura 4.</b> <i>Respuesta sísmica de una estructura frente a diferentes condiciones de cimentación</i> .....	7
<b>Figura 5.</b> <i>Espectros de respuesta para diferentes condiciones de suelo</i> .....	8
<b>Figura 6.</b> <i>Condiciones de suelos y los espectros de aceleración obtenidos en diferentes puntos de la ciudad de México durante el sismo del año 1985</i> .....	9
<b>Figura 7.</b> <i>Geología Regional</i> .....	12
<b>Figura 8.</b> <i>Ubicación puntos de descripción de Abanico de Ibagué</i> .....	17
<b>Figura 9.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1sur – Altura 10m aprox</i> .....	18
<b>Figura 10.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1sur – Altura 15m aprox</i> .....	18
<b>Figura 11.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1B sur – Altura 30m aprox</i> .....	19
<b>Figura 12.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del complejo acuático de la 42 con quinta – Altura 8m aprox</i> .....	20
<b>Figura 13.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del complejo deportivo del parque deportivo – Altura 6m aprox</i> .....	21
<b>Figura 14.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del barrio mandarinos– Altura 4m aprox</i> .....	22
<b>Figura 15.</b> <i>Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del Aeropuerto – Altura 4m aprox.</i> .....	22
<b>Figura 16.</b> <i>Mapa Neotectónico del noroeste de los Andes.</i> .....	23

<b>Figura 17.</b> Esquema Neotectonico de los Andes del Norte y el Caribe, (a) 20 millones de años atrás y en (b) el presente. ....	24
<b>Figura 18.</b> Principales fallas activas de importancia para la ciudad de Ibagué .....	25
<b>Figura 19.</b> Planes parciales.....	29
<b>Figura 20.</b> Perímetro de trabajo – Caracterización estructural .....	30
<b>Figura 21.</b> Clasificación de las unidades de construcción, edificación a edificación (a) y manzana a manzana (b) .....	31
<b>Figura 22.</b> Caracterización estructural por categoría de unidad de construcción Esc. 1:40.000.....	32
<b>Figura 23.</b> Área Caracterizada de edificaciones construidas, en construcción o proceso de licenciamiento. ....	34
<b>Figura 24.</b> Unidades de construcción de Categoría Baja (Esc 1:42,000) .....	35
<b>Figura 25.</b> Unidades de construcción de Categoría Media (Esc. 1:42,000) .....	35
<b>Figura 26.</b> Unidades de construcción de Categoría Media (Esc. 1:42,000) .....	36
<b>Figura 27.</b> Distribución comunas y Barrios de la ciudad de Ibagué .....	37
<b>Figura 28.</b> Numero de Niveles vs Numero de Edificaciones .....	39
<b>Figura 29.</b> Sistemas Estructurales vs Numero de Edificaciones .....	40
<b>Figura 30.</b> Sistema de Cimentación vs Numero de Edificaciones .....	41
<b>Figura 31.</b> Edificaciones típicas de categoría Baja.....	46
<b>Figura 32.</b> Edificaciones típicas de categoría Media.....	47
<b>Figura 33.</b> Edificaciones típicas de categoría Alta.....	47
<b>Figura 34.</b> Localización de Sondeos utilizados Esc 1:70.000 .....	49
<b>Figura 35.</b> Localización ensayos geofísicos Esc. 1:60,000 .....	50
<b>Figura 36.</b> Localización microtremores .....	50
<b>Figura 37.</b> % Gravas vs Profundidad .....	52
<b>Figura 38.</b> % Arenas vs Profundidad .....	53
<b>Figura 39.</b> % Finos vs Profundidad .....	54



<b>Figura 40.</b> LL vs IP .....	55
<b>Figura 41.</b> Numero de Golpes N1(60) vs Profundidad (m) .....	56
<b>Figura 42.</b> Localización muestras ensayos dinámicos de laboratorio .....	57
<b>Figura 43.</b> Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el ICBF) .....	58
<b>Figura 44.</b> Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el Polideportivo la Gaviota Muestra 2.....	59
<b>Figura 45.</b> Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el Polideportivo la Gaviota Muestra 6 .....	60
<b>Figura 46.</b> Resultados Ensayo de columna Resonante, curvas de frecuencia de confinamiento (a) y curva de decrecimiento de la vibración (b) .....	61
<b>Figura 47.</b> Resultados Ensayo de columna Resonante, curvas de degradación del módulo de corte (a) curva comportamiento del amortiguamiento (b) .....	62
<b>Figura 48.</b> Comportamiento dinámico de Arcillas (a) Degradación del módulo de corte G/Gmax (b) variación del amortiguamiento .....	64
<b>Figura 49.</b> Comportamiento dinámico de Limos (a) Degradación del módulo de corte G/Gmax (b) variación del amortiguamiento .....	65
<b>Figura 50.</b> Comportamiento dinámico de Arenas (a) Degradación del módulo de corte G/Gmax (b) variación del amortiguamiento .....	66
<b>Figura 51.</b> Curvas dinámicas (a) degradación del módulo de corte (b) variación del amortiguamiento .....	67
<b>Figura 52.</b> Mapa de velocidad de onda de corte del suelo Esc. 1:50.000 .....	70
<b>Figura 53.</b> Mapa de periodos fundamentales de vibración del suelo Ts, Esc. 1:50.000 .....	73
<b>Figura 54.</b> Zonas de subducción y de Benioff que general amenaza sísmica en el territorio colombiano. ....	76
<b>Figura 55.</b> Zonas continentales que generan amenaza sísmica en el territorio colombiano .....	77
<b>Figura 56.</b> Eventos sísmicos de la información recopilada para la amenaza sísmica del Estudio previo de amenaza, respuesta dinámica, y microzonificación sísmica para la ciudad .....	79
<b>Figura 57.</b> Distribución de las principales fallas regionales respecto a la ciudad de Ibagué .....	80
<b>Figura 58.</b> Ubicación regional de los eventos sísmicos respecto a las fallas regionales .....	81

<b>Figura 59.</b> Distribución de la amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué – Pares M-d .....	82
<b>Figura 60.</b> Espectros de amenaza uniforme en términos de Aceleración Espectral .....	83
<b>Figura 61.</b> Espectros de amenaza uniforme en términos de Desplazamiento Espectral .....	83
<b>Figura 62.</b> Espectros de amenaza uniforme en términos de Desplazamiento Espectral .....	84
<b>Figura 63.</b> Curva de amenaza sísmica para diferentes fuentes sismogénicas .....	85
<b>Figura 64.</b> Espectro de amenaza uniforme para un periodo de retorno (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 1000 años y (e) 2500 años .....	86
<b>Figura 65.</b> Participación por ambientes tectónicos para periodo de retorno de 475 años .....	88
<b>Figura 66.</b> Mapa de aceleraciones pico (PGA) para periodo de retorno de 475 años .....	89
<b>Figura 67.</b> Mapa de aceleraciones pico (PGA) para periodo de retorno de 975 años .....	89
<b>Figura 68.</b> Ambientes tectónicos de mayor aceleración pico (PGA) – Tr= 475 años .....	90
<b>Figura 69.</b> Espectros de Amenaza Uniforme en roca .....	91
<b>Figura 70.</b> Participación de distancias (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 975 años y (e) 2475 años .....	92
<b>Figura 71.</b> Participación de magnitudes (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 975 años y (e) 2475 años .....	93
<b>Figura 72.</b> Desagregación pares magnitud distancia para diferentes periodos de retorno, (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años y (d) 975 años .....	94
<b>Figura 73.</b> Sismo San Fernando ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	99
<b>Figura 74.</b> Sismo Iwate ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	99
<b>Figura 75.</b> Sismo Parkfield ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	100
<b>Figura 76.</b> Sismo Kobe ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	100

<b>Figura 77.</b> Sismo Tarapacá Estación TARA06R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	101
<b>Figura 78.</b> Sismo Tarapacá Estación TARA09R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	101
<b>Figura 79.</b> Sismo Tarapacá Estación TARA08R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente .....	102
<b>Figura 80.</b> Espectros de pseudo-aceleración ( $S_a$ ) de los eventos sísmicos seleccionados .....	103
<b>Figura 81.</b> Mapa de zonificación de suelo $0s < T_s < 0.5s$ y estructuras de unidad de construcción Baja .....	105
<b>Figura 82.</b> Mapa de zonificación de suelo $0s < T_s < 0.5s$ y estructuras de unidad de construcción Media .....	105
<b>Figura 83.</b> Mapa de zonificación de suelo $0s < T_s < 0.5s$ y estructuras de unidad de construcción Alta .....	106
<b>Figura 84.</b> Ubicación perfiles geotecnicos desarrollados sobre el área de trabajo.....	107
<b>Figura 85.</b> Perfiles A-A´ contiene (a) perfil geotécnico y estructural (b) perfil longitud- periodo fundamental de vibración .....	109
<b>Figura 86.</b> Urb. Ciudad Luz contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural .....	110
<b>Figura 87.</b> Perfiles B-B´ contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural .....	111
<b>Figura 88.</b> Barrio Topacio contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural .....	112
<b>Figura 89.</b> Perfiles C-C´ contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural .....	114
<b>Figura 90.</b> Perfiles D-D´ contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural .....	115

<b>Figura 91.</b> (a) Perfiles longitud- periodo fundamental de vibración C-C´ (Barrios Ciudad alminar, Ciudad Torreón y salado) (b) Perfiles longitud- periodo fundamental de vibración D-D´ (Urb. Villa Café) .....	116
<b>Figura 92.</b> Ubicación sitios de análisis de respuesta Sísmica .....	120
<b>Figura 93.</b> Perfil Estratigráfico determinista del sitio de análisis 1 .....	122
<b>Figura 94.</b> Relación profundidad vs pesos unitarios ( $kN/m^3$ ), y $V_s$ (m/s) para cada uno de los escenarios analizados del sitio 1 .....	123
<b>Figura 95.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenario 1, 4 y 7 .....	124
<b>Figura 96.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenarios 2, 5 y 8 .....	124
<b>Figura 97.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenarios 3, 6 y 9 .....	125
<b>Figura 98.</b> Espectros de respuesta en superficie – Sitio de análisis 1 .....	126
<b>Figura 99.</b> Comparación espectros de diseño (NSR-10, Microzonificación 2006 y Estudio de respuesta - sitio de análisis 1 .....	128
<b>Figura 100.</b> Perfil Estratigráfico determinista del sitio de análisis 2 .....	130
<b>Figura 101.</b> Relación profundidad vs pesos unitarios ( $kN/m^3$ ), y $V_s$ (m/s) para cada uno de los escenarios analizados del sitio 2 .....	131
<b>Figura 102.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenarios 1, 4 y 7.....	131
<b>Figura 103.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenarios 2, 5 y 8.....	132
<b>Figura 104.</b> Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte (G/Gmax) y variación del amortiguamiento), Escenarios 3, 6 y 9.....	132
<b>Figura 105.</b> Espectros de respuesta en superficie – Sitio de análisis 2 .....	134

<b>Figura 106.</b> Comparación espectros de diseño (NSR-10, Microzonificación 2006 y Estudio de respuesta sitio de análisis 2) .....	135
<b>Figura 107.</b> Vistas 3D - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa .....	138
<b>Figura 108.</b> Vistas en planta - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa .....	139
<b>Figura 109.</b> Vistas en alzada - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa .....	139
<b>Figura 110.</b> Vistas 3D - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa .....	140
<b>Figura 111.</b> Vistas en planta - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa .....	140
<b>Figura 112.</b> Vistas en alzada - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa .....	141
<b>Figura 113.</b> Vistas 3D - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa .....	141
<b>Figura 114.</b> Vistas en planta - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa .....	142
<b>Figura 115.</b> Vistas en alzada - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa .....	142
<b>Figura 116.</b> Vibración en estructuras sobreamortiguada, críticamente amortiguadas y subamortiguadas .....	148
<b>Figura 117.</b> Curva de degradación del módulo de corte con respecto a la deformación .....	150
<b>Figura 118.</b> Curva de degradación del módulo con respecto a la rigidez normalizada .....	152
<b>Figura 119.</b> Curva de degradación del módulo secante y tangencial del modelo HSS.....	154
<b>Figura 120.</b> Parámetros de resistencia para un ciclo de carga .....	155
<b>Figura 121.</b> Interfaz de las propiedades de los suelos del software de elementos finitos Plaxis 2D .....	156
<b>Figura 122.</b> Nivel de deformación unitaria $\gamma_-(0.7)$ .....	163
<b>Figura 123.</b> Ventana grafica – Perfil de análisis 1.....	165
<b>Figura 124.</b> Perfiles de análisis + Edificación de 2 niveles y cubierta en placa .....	166
<b>Figura 125.</b> Perfil de análisis 1 + Edificación de 3 niveles con cubierta en placa .....	166
<b>Figura 126.</b> Perfil de análisis 2 + Edificación de 5 niveles con cubierta en placa .....	167
<b>Figura 127.</b> Perfil de análisis 1 + Puntos de análisis en campo libre .....	168

<b>Figura 128.</b> Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P5, P6 y P7), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos corticales – Sitio de análisis 1 .....	170
<b>Figura 129.</b> Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P5, P6 y P7), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos intraplaca – Sitio de análisis 1 .....	171
<b>Figura 130.</b> Curvas de transferencia (Factores de amplificación) (a) Fuentes sísmicas corticales (b) Fuentes sísmicas intraplaca – Sitio de análisis 1 .....	172
<b>Figura 131.</b> Perfil de análisis 2 + Puntos de análisis en campo libre .....	173
<b>Figura 132.</b> Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P0, P3 y P5), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos corticales – Sitio de análisis 2 .....	175
<b>Figura 133.</b> Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P0, P3 y P5), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos intraplaca – Sitio de análisis 2 .....	176
<b>Figura 134.</b> Curvas de transferencia (Factores de amplificación) (a) Fuentes sísmicas corticales (b) Fuentes sísmicas intraplaca – Sitio de análisis 2 .....	177
<b>Figura 135.</b> Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1 y nivel 2 de la estructura de 2N (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 1.....	178
<b>Figura 136.</b> Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1, nivel 2 y nivel 3 de la estructura de 3N (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 1.....	179
<b>Figura 137.</b> Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos corticales y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S1-2N, (b) S2-2N, (c) S3-2N, (d) S4-2N, (e) S1-3N, (f) S2-3N, (g) S3-3N, (h) S4-3N .....	181
<b>Figura 138.</b> Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos intraplaca y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S5-2N, (b) S6-2N, (c) S7-2N, (d) S5-3N, (e) S6-3N, (f) S7-3N .....	182

<b>Figura 139.</b> Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1 y nivel 2 de la estructura de 2N (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 2 .....	183
<b>Figura 140.</b> Factores de amplificación en cada nivel de los cinco niveles de la estructura (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 2 .....	184
<b>Figura 141.</b> Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos corticales y estructuras de 2 y 5 niveles del sitio de análisis 2, (a) S1-2N, (b) S2-2N, (c) S3-2N, (d) S4-2N, (e) S1-5N, (f) S2-5N, (g) S3-5N, (h) S4-5N .....	186
<b>Figura 142.</b> Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos intraplaca y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S5-2N, (b) S6-2N, (c) S7-2N, (d) S5-5N, (e) S6-5N, (f) S7-5N .....	187
<b>Figura 143.</b> Diagramas de derivas según la NSR-10 por nivel, desplazamientos horizontales en respuesta a la amenaza sísmica cortical e intraplaca. (a) S1 – 2N, (b) S1 – 3N, (c) S2 – 2N, (d) S2 – 5N .....	190
<b>Figura 144.</b> Mapa de categorización por índice de resonancia sísmica .....	193
<b>Figura 145.</b> Mapa de categorización por índice de deriva máxima .....	193
<b>Figura 146.</b> Mapa de categorización por la antigüedad de la edificación. ....	194
<b>Figura 147.</b> Mapa de zonificación por interacción sísmica suelo estructura .....	196

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> <i>Sistemas estructurales típicos</i> .....	40
<b>Anexo 2.</b> <i>Características estructurales de edificaciones aforadas</i> .....	42
<b>Anexo 3.</b> <i>Recopilación de información geotécnica existente</i> .....	48
<b>Anexo 4.</b> <i>Perfiles geotécnicos</i>	
<b>Anexo 4-1.</b> <i>Sección A-A'</i> .....	107
<b>Anexo 4-2.</b> <i>Sección B-B'</i> .....	110
<b>Anexo 4-3.</b> <i>Sección C-C'</i> .....	113
<b>Anexo 4-4.</b> <i>Sección D-D'</i> .....	113



## Tabla de Símbolos

$A_v$	=	Velocidad horizontal Pico Efectiva
$\beta$	=	Amortiguamiento (%)
$c'$	=	Cohesión (kPa)
$C_t$	=	Parámetro de acuerdo con la Tabla A.4.2-1 del título A de la NSR-10
$C_u$	=	Coficiente utilizado para calcular T de acuerdo con el numeral A.4.2 del título A de la NSR-10
$e_{init}$	=	Relación de vacíos inicial
$e$	=	Relación de vacíos de los suelos
$E$	=	Módulo de elasticidad (MPa)
$\xi$	=	Razón de amortiguamiento
$E_{ur}$	=	Módulo de Young (kPa)
$E_{50}^{ref}$	=	Módulo de Young de Referencia (Carga triaxial) (kPa)
$E_{oed}^{ref}$	=	Módulo de Young de Referencia (Carga Edométrica) (kPa)
$E_{ur}^{ref}$	=	Módulo de Young de Referencia (Carga/descarga) (kPa)
$f$	=	Frecuencia (Hz)
$f_p$	=	Frecuencia predominante del sismo (Hz)
$f_1$	=	Frecuencia de vibración natural del suelo (Hz)
$f_2$	=	Frecuencia de vibración (Hz)
$f'_c$	=	Resistencia específica a la compresión (MPa)
$f_y$	=	Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo (MPa)
$f'_m$	=	Resistencia de los muros en mampostería (MPa)
$f_i$	=	Fuerzas horizontales distribuidas por nivel de la estructura (kN)
$F_v$	=	Factor de amplificación de la Velocidad horizontal Pico Efectiva
$G_s$	=	Gravedad específica de los suelos
$G$	=	Módulo de corte (kPa)
$G_{max}$	=	Módulo de corte máximo (kPa)
$G/G_{max}$	=	Módulo de corte normalizado
$G_t$	=	Módulo de corte tangencial (kPa)
$G_{ur}$	=	Módulo de corte tangencial (kPa)

$G_0^{\text{ref}}$	=	Módulo de corte para pequeñas deformaciones (kPa)
$h_i$	=	Espesor de cada estrato de suelo que compone el perfil estratigráfico (m)
$H/V$	=	Relación espectral, Método de Nakamura
$h$	=	Altura del edificio, medido desde la base de la edificación (m)
$I$	=	Inercia ( $m^4$ )
IRS	=	Índice de Resonancia Sísmica
IDM	=	Índice de Deriva Máxima
IP	=	Índice de Plasticidad (%)
K	=	Coefficiente de influencia de la rigidez, (Bentley, 2020).
$K_0^{\text{nc}}$	=	Coefficiente de presión de tierras NC ( $1 - \sin \varphi'$ )
LL	=	Límite líquida (%)
$m$	=	Nivel de dependencia tensional Rigidez /Esfuerzo (Poder)
$m_i$	=	Masa de los elementos estructurales por nivel (kg)
M	=	Coefficiente de influencia en influencia de la masa
$M_w$	=	Magnitud momento
$M_l$	=	Magnitud local
$M_s$	=	Magnitud de ondas superficiales
$n_i$	=	Número de estratos de suelo o niveles de la estructura
$n$	=	Porosidad de los suelos
$P_{\text{ref}}$	=	Presión de referencias = 100 kPa
$PGA$	=	Aceleración pico del terreno (g)
$\rho$	=	Densidad del Suelo ( $kg/m^3$ )
$\varphi'$	=	Ángulo de interacción interna del suelo ( $^\circ$ )
$R_{\text{ISSE}}$	=	Riesgo por Interacción Sísmica Suelo-Estructura
$R_{\text{RUP}}$	=	Distancia más cercana al área de ruptura (Km)
$S_a$	=	Aceleración espectral ( $m/s^2$ )
$\delta_i$	=	Deflexiones horizontales en los elementos estructurales (cm)
$S$	=	Grado de saturación de los suelos (%)
$\tau_{\text{max}}$	=	Esfuerzo cortante a la falla (kPa)
$T_a$	=	Período de vibración aproximado de la estructura (s)
T	=	Periodo Fundamental de vibración máximo permitido (s)

$T_e$	=	Periodo fundamental de vibración de las edificaciones (s)
$T_s$	=	Periodo predominante vibración en superficie del suelo (s)
$T_m$	=	Periodo medio del sismo (s)
$T_r$	=	Periodo de retorno del sismo (años)
$\nu_{ur}$	=	Relación de Poisson
$\nu'_{ut}$	=	Relación de Poisson (Carga/Descarga)
$V_{si}$	=	Velocidad de onda de corte del suelo del estrato i (m/s)
$\omega$	=	Frecuencia angular (rad/s)
$\omega_1$	=	Frecuencia angular para el modo de vibración 1 (rad/s)
$\omega_2$	=	Frecuencia angular para el modo de vibración 2 (rad/s)
$\gamma\%$	=	Deformación (%)
$\gamma_{max}$	=	Máximas deformaciones cortantes (%)
$\gamma'_{eff}$	=	Deformación cortante efectiva (%)
$\gamma_r$	=	Deformación Umbral de Corte (%)
$\gamma_r$	=	Deformación por cortante cuando $G = 0.722G_{max}$ (%)
$\gamma$	=	Peso específico del Suelo ( $kN/m^3$ )
$\psi$	=	Ángulo de dilatancia (°)
$\alpha$	=	Parámetro de acuerdo con la Tabla A.4.2-1 del título A de la NSR-10
$\alpha$ y $\beta$	=	Coefficientes de amortiguamiento Rayleigh
$\delta$	=	Decremento logarítmico
$\Delta e$	=	Incremento de deformación

## Introducción

La ciudad de Ibagué capital del departamento del Tolima, se localiza en la Cordillera Central entre el Valle del Río Magdalena y el Cañón del Combeima, geológicamente se compone por depósitos cuaternarios de origen volcánico, fluviovolcánico, aluviotorrencial y aluvial. Sobre la ciudad predominan dos unidades litológicas principales, el Abanico de Ibagué y Batolito de Ibagué. El primero subyace alrededor del 60% del territorio urbano y está compuesto por múltiples episodios de actividad torrencial sobre el Río Combeima y las Quebradas Las Panelas, Calambeo, Ambalá y algunas otras que han formado Abanicos Coalescentes; la segunda aflora sobre el flanco Oriental de la Cordillera Central (Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2000).

Ibagué se caracteriza por dos zonas topográficas, una montañosa y una plana. La primera, conformada por rocas duras (Anfibolitas, neises anfibólicos y mármoles), remanentes de lava de composición Andesítica y Basáltica, Suelos Residuales como Arenas limosas mal gradadas y limos orgánicos de baja plasticidad y resistencia con profundidades de hasta 10m. Además, existen Depósitos de Piedemonte como arenas y limos con grava muy descompuestos. La zona plana está conformada principalmente por Depósitos Fluviovolcánico con fragmentos angulares de hasta 2 metros de diámetro, con limos de baja plasticidad, arenas limosas, arcillosas y pobremente gradadas con profundidades del manto rocoso hasta de 150m (Alfaro, y otros, 2001).

De acuerdo con la amenaza sísmica, Ibagué se encuentra en una zona intermedia con coeficientes de aceleración y velocidad pico efectiva de 0.20, respectivamente (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2009). La zona urbana es atravesada por la Falla de Ibagué, la cual se ha considerado una estructura continua de rumbo lateral derecha, de acuerdo con lo establecido en el Mapa Geológico de Colombia 2019 elaborado por el Servicio Geológico Colombiano. Se ha evidenciado que la falla de Ibagué está compuesta por particiones de la deformación a lo largo de su trazo por el Abanico de Ibagué, mostrando una mayor magnitud de expresión hacia el Oriente de la Ciudad, además es reconocida con actividad sísmica reciente y con una magnitud sísmica probable de  $ML=7$  (Jaramillo et al., 2000). De acuerdo con las características sísmicas y la morfoestructura de la Falla de Ibagué, se considera a la ciudad una fuente potencialmente peligrosa para la generación de movimientos tectónicos (Osorio , y otros, 2008).

Con la finalidad de conocer el comportamiento de las estructuras tectónicas activas y potenciales para la ciudad de Ibagué, se han realizado los siguientes estudios:

1. Estudio Paleo sísmológico de la Falla de Ibagué elaborado por el Servicio Geológico Colombiano antiguo INGEONIMAS en el año 2000.
2. Estudio preliminar de la evaluación de la Respuesta Sísmica, la Cartografía Geológica, Geotécnica e Instrumentación Sísmológica de la Ciudad; realizado por la Alcaldía de Ibagué.

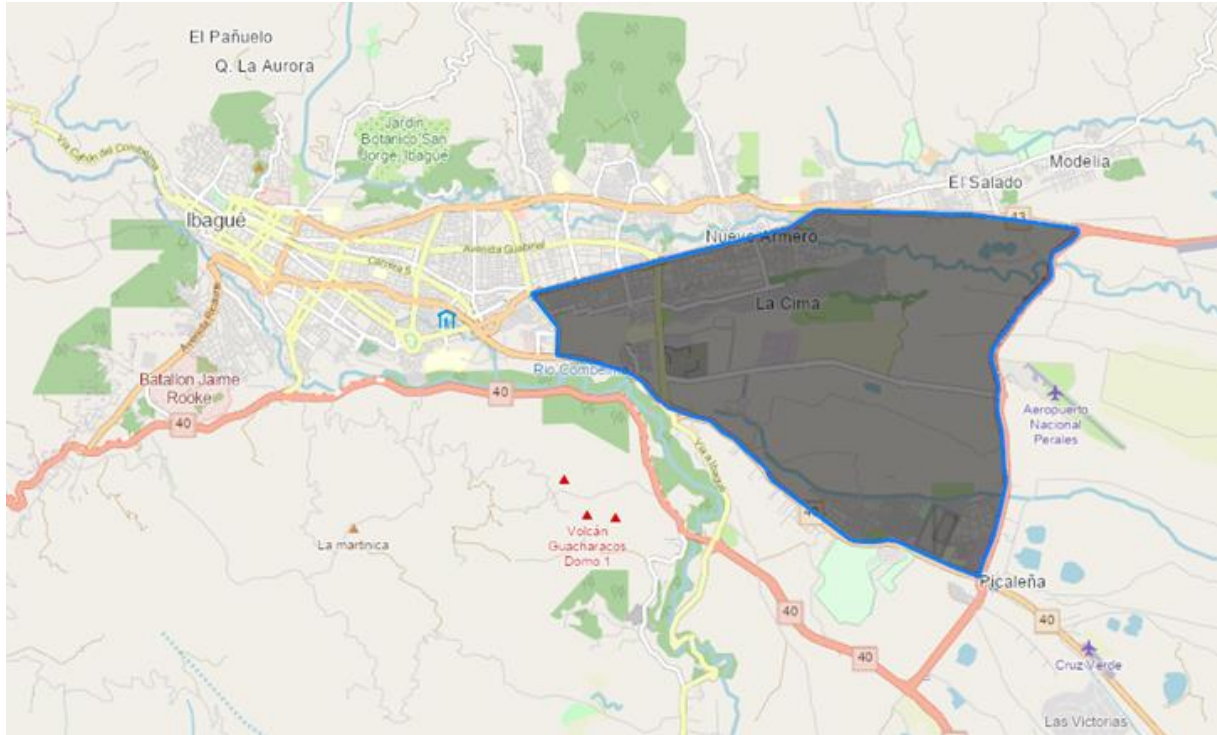
3. Estudio preliminar de microzonificación Sísmica de la Ciudad, por parte del Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana.
4. Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué complementado en el año 2013 por el Centro de Estudios sobre Desastres Naturales y Riesgo CEDERI.
5. Actualización de la Microzonificación Sísmica en el municipio de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2020.

Según las estadísticas del Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Ibagué cuenta con 529.635 habitantes de los cuales 492.554 habitan en la cabecera Urbana de la ciudad. Cerca de 37.081 personas habitan en centros poblados y zona rural dispersa, mostrando un crecimiento del 16.96%, con relación al censo entregado en el año 2003 (Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2018).

Complementando lo anterior, la localización geográfica privilegiada de la ciudad hace de Ibagué un lugar atractivo y estratégico para los inversionistas nacionales e internacionales, contando con una amplia oferta de proyectos de infraestructura, con cerca de 125.670 metros cuadrados licenciados para construcción nueva. El 6.13% son para viviendas tipo VIS, 91.82% para viviendas no VIS y el 2.05% licenciados para edificaciones con uso comercial e institucional, tal y como lo da a conocer la Cámara Colombiana de la Construcción, en su informe Colombia Construcción en cifras del mes de abril de 2020. La zona en la cual se evidencia el mayor número de edificaciones en construcción es principalmente la Zona de Expansión Oriental de la ciudad, entre los barrios Salado y Picalaña que hacen parte de las comunas ocho (8) y nueve (9), respectivamente.

Teniendo en cuenta el crecimiento de la ciudad en temas de infraestructura, las condiciones sísmicas a las cuales se puede ver afectada la ciudad y las características geotécnicas del subsuelo, nace una incertidumbre que radica en la veracidad de los estudios geológicos, geotécnicos y sísmicos que se han desarrollado en Ibagué. Se requiere conocer de manera correcta el comportamiento de las propiedades mecánicas y dinámicas del suelo frente a las diferentes condiciones sísmicas a las cuales se podrían ver afectadas las edificaciones de la Zona de Expansión Oriental de la Ciudad.

Con base en lo anterior, surgió la necesidad que radicaba en conocer de manera adecuada y con base en la información geotécnica, estructural y sísmica existente, la zonificación por interacción sísmica suelo-estructura de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué. El polígono de estudio se comprende de 21.57  $km^2$  entre la carrera 5ta y Avenida Miro lindo y calles 60 y 145, de acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Ibagué, Tolima aprobado según en el Decreto No. 0823 de 2014 de la Secretaría de Planeación Municipal de Ibagué, ver Figura 1.



**Figura 1.** *Perímetro de influencia directa del proyecto*  
**Fuente:** *Propia con apoyo del software ArcGIS Pro online, 2019.*

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Establecer la zonificación por interacción sísmica suelo-estructura de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué.

### **Objetivos específicos**

1. Obtener los registros útiles de los eventos sísmicos que contribuyan a la amenaza sísmica de Ibagué.
2. Definir a partir de la información existente la caracterización geotécnica del subsuelo de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué.
3. Identificar la caracterización de tipologías estructurales sobre la Zona de Expansión Oriental de Ibagué.
4. Determinar la respuesta sísmica de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué.
5. Zonificar la respuesta sísmica por ISSE de la Zona de Expansión Oriental de Ibagué.

# Capítulo I

## Marco teórico

### 1.1. Interacción sísmica, suelo y estructura

La interacción sísmica suelo estructura relaciona todos los efectos cinemáticos e inerciales que se producen entre el suelo y la estructura, principalmente como resultado de la deformabilidad del suelo ante una señal sísmica. La interacción producida modifica las propiedades dinámicas de la estructura, así como el comportamiento del subsuelo (Aviles et al., 2004). Al momento de realizar un análisis por interacción sísmica suelo estructura se logra obtener diseños óptimos y coherentes conforme al comportamiento real que se evidenciará, reduciendo el cortante basal y las derivas de entrepiso, entre otras características estructurales. Sin embargo, existen situaciones en las cuales las características geotécnicas y sísmicas del sitio no permiten obtener respuestas por Interacción sísmica suelo-estructura ISSE favorables (Soriano,1989).

Las señales en campo libre sufren modificaciones importantes debido a la presencia de estructuras y efectos de sitio por las características geotécnicas, y las propiedades estáticas y dinámicas del suelo por el que atraviesa las ondas de corte (Olarte, 2009). En la Figura 2, se evidencia la respuesta sísmica que experimenta un punto donde está ubicada una edificación y la respuesta sísmica de ese mismo lugar si la edificación no existiera. En la Figura 2(a) se muestran las aceleraciones que se producen sobre la superficie en un punto que está expuesto a condiciones de campo libre. En la Figura 2(b), la misma señal propagada se encuentra frente a una condición adicional, una edificación sobre la superficie del suelo, la cual tiene un periodo fundamental de vibración propio, lo que puede originar una modificación tanto en amplitud como en duración y contenido frecuencial.

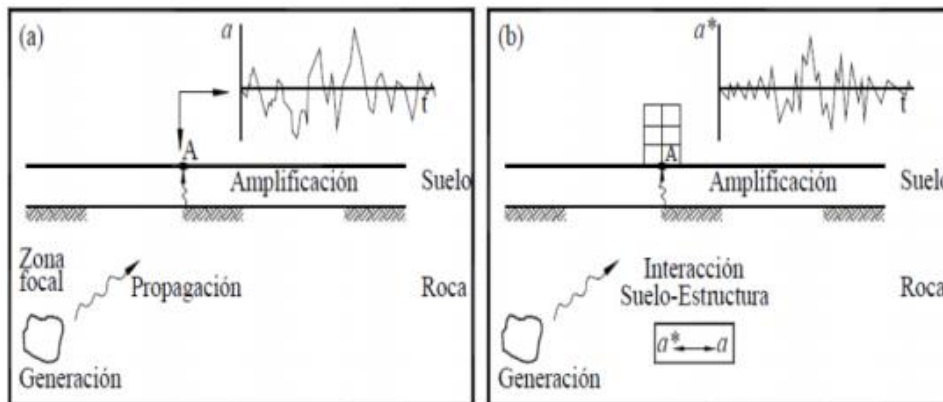
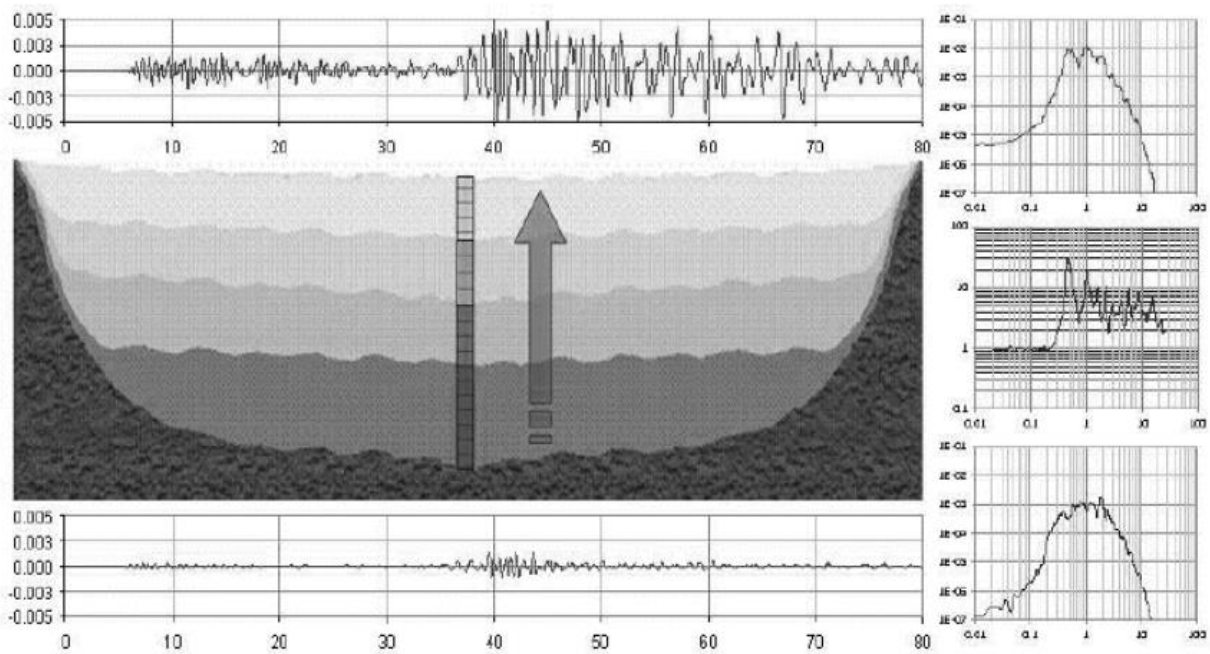


Figura 2. Modificación del movimiento del campo libre

Fuente: Soriano, 1989



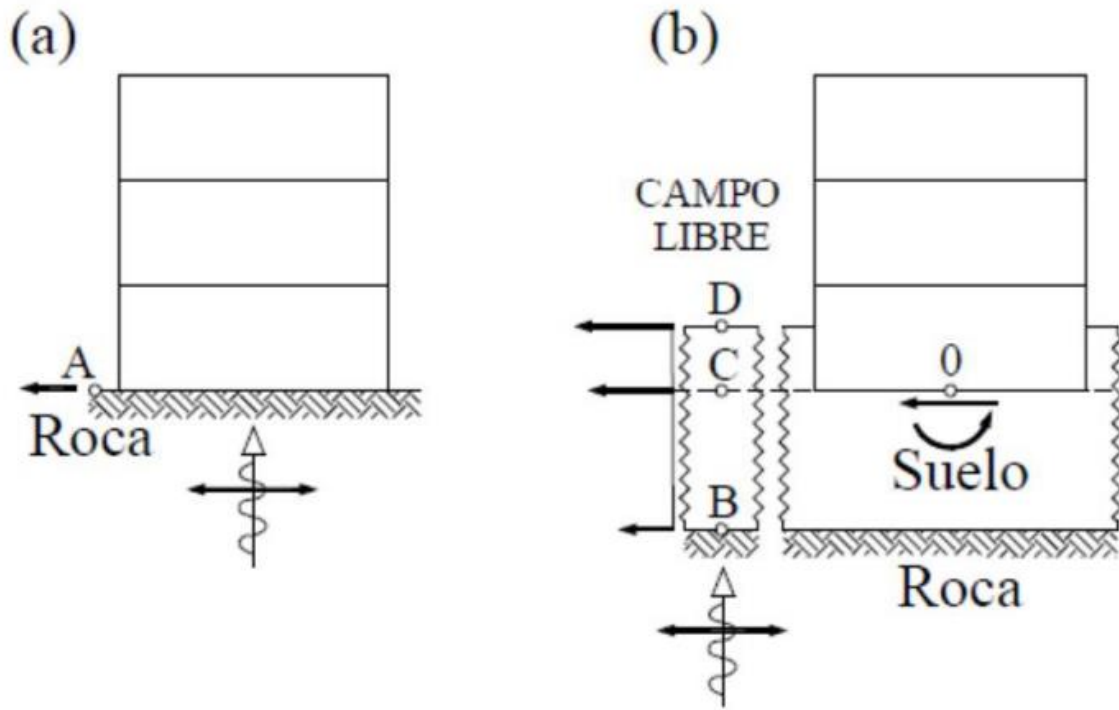
Al evaluar la respuesta sísmica, además de las propiedades estructurales de las edificaciones en superficie y las características de los suelos que subyacen la zona, es necesario conocer los efectos de sitio como condiciones geológicas, topográficas y propiedades estáticas y dinámicas del suelo. Las cuales, producen modificaciones en la respuesta sísmica (Aki, 1988); tal y como se evidencia en la Figura 3. A medida que las ondas de corte atraviesan un estrato de suelo (flexible), se puede llegar a producir atenuación o amplificación de la señal que se refleja en suelo rígido (Roca). Así mismo, en el momento en que la onda sísmica alcanza la base de la estructura, produce en el sistema suelo-cimentación un efecto de interacción sísmica que en situación adversas puede poner en riesgo la integridad de la edificación (Botero, y otros, 2004),



**Figura 3.** Respuesta Dinámica del Subsuelo y Efectos de Sitio

**Fuente:** Estudios de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué, CEDERI, 2014. Soriano, 1989

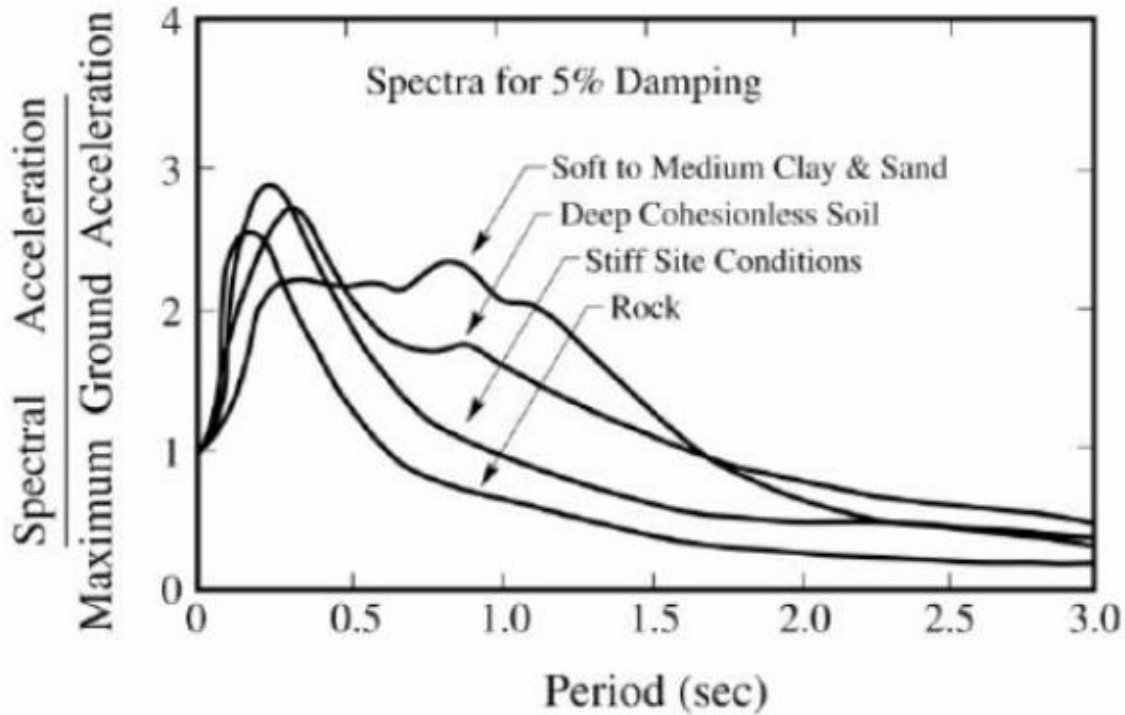
Con la finalidad de conocer aspectos importantes en la respuesta sísmica por interacción sísmica suelo estructura, la Figura 4 muestra dos escenarios distintos frente a la propagación de una misma señal, el primero, una estructura cimentada sobre roca sin empotrar y el segundo una estructura empotrada, (Wolf, 1994). Al generarse un movimiento sísmico se producirá un momento y una fuerza de corte transversal que actúa en la base, sin embargo, por la alta rigidez de la roca no se desarrollan deformaciones, tal y como se muestra en la Figura 4(a). Por otro lado, la respuesta sísmica en el punto 0 de la Figura 4(b) será distinto a la señal sísmica propagada en la roca ya que al atravesar el estrato de suelo se producen amplificaciones o atenuaciones en las amplitudes y contenido frecuencial de la señal.



**Figura 4.** Respuesta sísmica de una estructura frente a diferentes condiciones de cimentación  
**Fuente:** Wolf, 1994.

Las condiciones del suelo ejercen gran influencia en los espectros de respuesta dependiendo de la rigidez y composición litológica de estos. En la Figura 5 se presentan espectros de respuesta de aceleraciones normalizadas para diferentes condiciones de suelos. A pequeñas deformaciones, los suelos arcillosos generan atenuaciones en las aceleraciones y reducción de su contenido frecuencial, lo contrario se da con un suelo de condiciones rígidas, el cual produce amplificaciones en las aceleraciones (Seed, et al., 1976).

Por otro lado, al producirse un aumento en los esfuerzos del suelo y generarse altas deformaciones, se produce la degradación del módulo de rigidez, con mayor rapidez en los suelos granulares que en los suelos cohesivos, y una variación en el amortiguamiento alcanzando mayores niveles en los suelos cohesivos que los suelos granulares (Dobry et al., 2000).



*Figura 5. Espectros de respuesta para diferentes condiciones de suelo  
Fuente: Seed, et al., 1976*

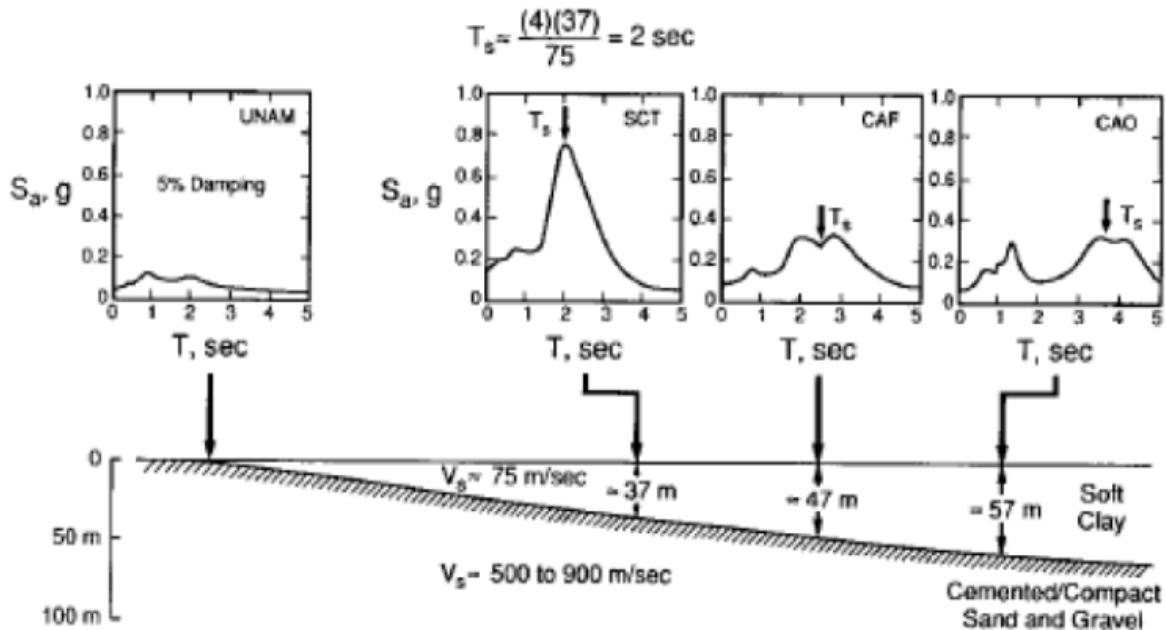
Para la determinación de la respuesta sísmica por interacción sísmica suelo estructura de edificaciones se requiere tener conocimiento de las condiciones de tres aspectos relevantes, los cuales son: Las características de los eventos sísmicos que representan la amenaza sísmica de la zona de estudio, las características estructurales de las edificaciones y el comportamiento estático y dinámico de los suelos que subyacen el sitio.

## 1.2. Periodos de vibración

Cuando los periodos de vibración de la excitación, la estructura y el suelo que las subyacen, son similares, se produce una amplificación sísmica con valores relativamente altos o en los casos más críticos se produce el fenómeno de resonancia. Lo anterior, pone en riesgo la integridad de la edificación, ocasionando incrementos o reducciones drásticas de la respuesta estructural. Los periodos en los cuales se dan los máximos locales se conocen con el nombre de periodos naturales del suelo ( $T_s$ ) y existen diferentes metodologías para su determinación, la más usual es el método japonés que depende de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), el número de estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico ( $n$ ) y del espesor de cada estrato de suelo ( $h_i$ ), como se muestra en la Ecuación 1

$$T_S = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}} \quad (1)$$

En la Figura 6 se evidencian diferentes condiciones de suelos y los espectros de aceleración obtenidos en diferentes puntos de la ciudad de México durante el sismo del año 1985, en los cuales se generó el fenómeno de resonancia, (Seed et al., 1988). Aunque el Método Japonés es el más utilizado para la clasificación de sitio, su limitación radica principalmente en la profundidad del manto rocoso, ya que se logra obtener una adecuada clasificación si el suelo tiene una profundidad máxima de 30m, cuando el manto rocoso se encuentra por debajo de esta profundidad probablemente se evaluaría erróneamente la respuesta sísmica del sitio. Para este caso se recomienda la aplicación el Método de Nakamura que permite la determinación del período predominante de un sitio, a través de la medición de vibraciones ambientales y cálculo de la relación espectral H/V (Verdugo, 2017).



**Figura 6.** Condiciones de suelos y los espectros de aceleración obtenidos en diferentes puntos de la ciudad de México durante el sismo del año 1985

*Fuente:* Seed, et al., 1988

El periodo fundamental de vibración de la estructura es otro de los parámetros necesarios para la evaluación de respuesta sísmica por interacción sísmica suelo estructura, por eso es necesario tener conocimiento de su determinación. El título A de la Norma Colombiana de Sismoresistencia en su inciso A.4.2, establece que el valor del período fundamental de vibración de la edificación, debe obtenerse a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica. De acuerdo con los principios de la dinámica estructural, utilizando un modelo

matemático linealmente elástico de la estructura. Este requisito puede suplirse por medio de la Ecuación 2.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i \delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (f_i \delta_i)}} \quad (2)$$

Donde, T es el periodo fundamental de vibración de la estructura,  $m_i$  corresponde a la masa de los elementos estructurales por nivel,  $n$  el numero de niveles de la edificación,  $f_i$  representa las fuerzas horizontales distribuidas y  $\delta_i$  son las deflexiones horizontales. Además, para edificaciones de menos de 12 pisos, con alturas de entrepiso inferiores a 3 m y cuyo sistema estructural de resistencia sísmica está compuesto por pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado o acero estructural, el período de vibración aproximado ( $T_a$ ), en segundos, puede determinarse por medio de la Ecuación 3.

$$T_a = 0.1 \times \text{Número de pisos} \quad (3)$$

Para la determinación de la respuesta sísmica por Interacción Sísmica Suelo Estructura (ISSE) es de vital importancia conocer la amenaza sísmica de la zona de estudio, la cual se determina por medio de la definición y discretización de las fuentes sismogénicas. Con lo anterior, se desarrolla un modelo de atenuación, posteriormente la integración de la amenaza y la determinación de los espectros de amenaza uniforme. En consecuente, se obtiene la desagregación de la amenaza en función de las combinaciones de magnitud y distancia para diferentes periodos de retorno.

## Capítulo II

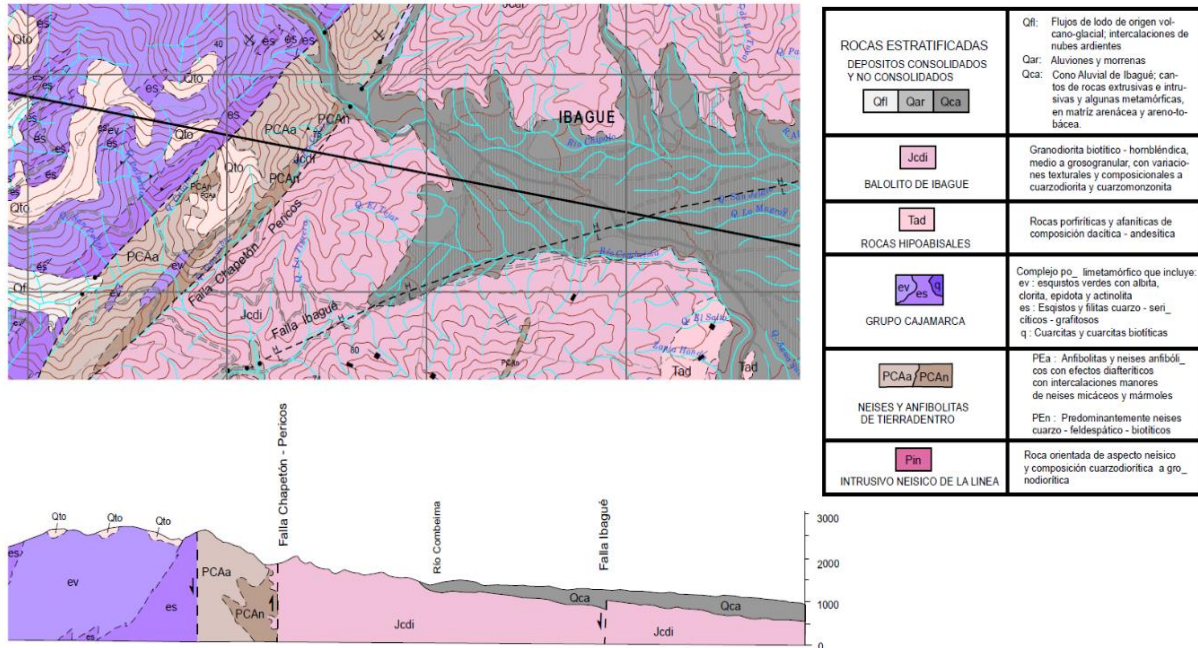
### Geología Regional y Local

El territorio Colombiano se encuentra ubicado en la zona Noroccidental de Sudamérica. A lo largo de los años, ha presentado una evolución geológica que data de aproximadamente 1780 millones de años, generando la distribución de distintos tipos de rocas a lo largo del territorio. Lo componen rocas antiquísimas como el escudo de precámbrico de la regional oriental del país, hasta rocas más jóvenes como la Cordillera de los Andes y la conformación topográfica que actualmente existe (Ingeominas, 2001).

Colombia está localizado sobre la convergencia de tres (3) de las quince (15) placas principales del mundo, como son la placa del Caribe, Nazca y Sudamericana, or esta razón, se origina distintos tipos de fallas geológicas. El municipio de Ibagué pertenece a la geomorfo-estructura del sistema orogénico Andino, en una depresión de origen tectónico, que está constituida de un basamento cristalino. Sobre el municipio predominan las rocas intrusivas del Batolito de Ibagué, de edad jurásico, sobre el cual reposa un conjunto de depósitos cuaternarios de origen fluvio-volcánico, fluvio-torrencial, aluvio-torrencial y aluvial que conforman el Abanico de Ibagué (Lobo-Guerrero, 1987).

#### 2.1. Geología Regional

Tal y como se evidencia en la Figura 7, la región se constituye de materiales geológicos de origen tanto ígneo, metamórfico y sedimentación de diferentes edades que van desde el Precámbrico (PCAA/PCAn) hasta el Cuaternario (Qfl, Qar y Qca). En este intervalo de tiempo se produjo la intercalación de diferentes unidades del Paleozoico (ev, es y q), del Jurásico (Jcdi), Cretácico (Kis y Kv), Paleógeno (Pin), Neógeno (NgH) y Plio-Cuaternario (NgQp).



**Figura 7. Geología Regional**  
Fuente: Mosquera y Núñez, 2013.

### 2.1.1. Periodo Precámbrico

Según dataciones de Barreto y Vesga, del año 1976, al periodo precámbrico se asocian rocas del metamorfismo regional de alto grado de 1300 millones de años, entre ellas la más representativa es la intercalación de neises y de anfibolitas de Tierradentro (Mosquera et al., 1982). Hacia el occidente de la ciudad de Ibagué afloran neises y anfibolitas de Tierradentro (PCAa/PCAn), que se extienden en la dirección NE-SW, con aproximadamente 2.0km de ancho. Además, se intercalan zonas angostas y discontinuas de milonita y otras rocas cataclásticas, atribuido al metamorfismo dinamo-térmico de la zona de falla Chapetón – Pericos.

Los neises son rocas de color claro bandeadas, caracterizadas por una textura granular gruesa, se componen principalmente de plagioclasas, cuarzos y anfíboles. Por otra parte, la roca anfibolita es de textura nematoblástica de clivaje regular, y sus principales minerales son las Plagioclasas y Hornblenda, con cristales alargados de hábito acicular<sup>1</sup>, orientados SW-NE, dándole a la roca un color negro.

<sup>1</sup> Cristal delgado en forma de aguja

### **2.1.2. Periodo Paleozoico**

El grupo Cajamarca está compuesto por un conjunto de rocas con metamorfismo regional de grado medio, el cual constituye el núcleo de la cordillera Central; aflora sobre el occidente de la falla Chapetón-pericos y colinda con la unidad de Neises y Anfibolitas de Tierradentro (Universidad de los Andes, 2021). Hacia el N30°E las rocas se interestratifican en bandas lenticulares alargadas, en el rumbo de la cordillera central, orientación que también concuerda con los planos de la foliación metamórfica (González, 1989).

Por otro lado, el grupo Cajamarca está constituida por una variedad de rocas, de las cuales predominan los esquistos verdes con clorita – actinolita y epidota, además esquistos y filitas cuarzo sericíticos y grafitosos, por cuarcitas y cuarcitas biotíticas (Mosquera et al, 2013).

### **2.1.3. Periodo Mesozoico**

El Batolito de Ibagué de edad triásico – Jurásico, es la mayor exposición de Roca ígnea plutónica del departamento del Tolima, del periodo Mesozoico de edades de hasta 150 millones de años, de acuerdo con dataciones radiométricas sobre el municipio de Armero, departamento del Tolima (Barrero & Vesga, 1976).

La textura de la Roca del Batolito de Ibagué es fanerítica de grano medio a grueso y sus principales minerales son la plagioclasa (51%), el cuarzo (24%), la ortoclasa (10%), la biotita (8%) y la hornblenda (6%). Así mismo, esta unidad litológica es de suma importancia en el comportamiento sísmico ya que constituye el basamento que subyace los depósitos sobre los que está cimentada la ciudad (Mosquera y Núñez, 2013). El Batolito de Ibagué se encuentra en contacto fallado con los neises y anfibolitas de Tierradentro a través de la falla de Chapetón-Pericos y de la falla de Ibagué con las rocas del Complejo Cajamarca (Vergara y Moreno, 1992).

### **2.1.4. Periodo Cenozoico**

El periodo cenozoico terciario se representa por rocas sedimentarias del grupo Gualanday y Honda, que corresponden a los periodos Paleógeno y Neógeno, respectivamente. Así mismo, el periodo del cenozoico cuaternario se constituye por depósitos consolidados y no consolidados.

#### **2.1.4.1. Grupo Gualanday (PgG)**

El Grupo Gualanday aflora a 20km al oriente de la ciudad de Ibagué, por su cabalgamiento sobre rocas del Cretácico, actúa como barrera que retiene el Abanico de Ibagué. El Grupo Gualanday está compuesto por una sucesión de estratos plegados, con un espesor de 600m,



formados por intercalaciones de conglomerados areniscas y arcillolitas (Universidad de los Andes, 2020).

#### **2.1.4.2. Grupo Honda (Tsh)**

Unidad litológica compuesta por estratos gruesos de areniscas conglomeráticas y areniscas cuarzo-feldesespáticas y líticas, intercalados con lodolitas, contactos discordante y fallado sobre el Grupo Gualanday (Universidad de los Andes, 2020).

#### **2.1.4.3. Flujos de lavas (Ql)**

Esta unidad corresponde a rocas volcánicas efusivas, producto del volcanismo monogenético de edad reciente, por acción volcánica del volcán Guacharacos, presente sobre la variante de Ibagué a Armenia, cubriendo el Batolito de Ibagué, y en la vereda Tabor en la salida a Rovira, aparentemente subyaciendo el Abanico de Ibagué (Ingeominas, 2004).

#### **2.1.4.4. Abanico de Ibagué (Qca)**

El Abanico de Ibagué está conformado por extensos depósitos vulcano-clásticos desplazados por el cauce del Rio Combeima, su forma geométrica es un Abanico de bajas pendientes y relieve suave. Por la actividad lávica y piroclástica del volcán del Tolima, se compone de intercalaciones de grava y arenas conglomeráticas, transportada por lahares y flujos piroclásticos, con aporte subordinado de origen aluvial y fluvio-torrencial.

La unidad estratigráfica del Abanico de Ibagué ocupa la mayor parte del área urbana de la ciudad de Ibagué, con una extensión de cerca de  $700\text{km}^2$ , que va desde el oriente de la ciudad hasta la cadena montañosa del Grupo Gualanday, donde se ubican los municipios de piedras y Alvarado, los corregimientos de Buenos Aires y Doima. Sobre el flanco izquierdo del Rio Combeima en dirección oriente se forman taludes que son producto del entalle sobre el Abanico de Ibagué, con espesores superiores a los 80m (J. Acosta et al., 2002).

El Abanico de Ibagué este compuesto por fragmentos de roca matriz-soportados y clasto-soportados con intercalaciones de capas lenticulares de arenas limosas y limos arenosos. Aproximadamente un 85% de los fragmentos son rocas volcánicas efusivas, en mayor proporción las rocas andesitas, dacitas, y pómez. Los depósitos del Abanico de Ibagué se componen por un 50% a 70% de gravas y bloques, 30% a 40% de las arenas con gravas y de un 5% a 10% de arenas volcánicas y finos (H. Acosta y Ramírez, 1985).

## 2.2. Geología Local

La Sociedad Tolimense de Ingenieros en el año 2012 estableció el Estudio de Cartografía Geológica de la Ciudad donde se encuentra la zonificación geológica y geomorfológica a nivel local del perímetro urbano de la ciudad de Ibagué. Además, la Alcaldía de Ibagué en el año 2020, a través del contrato de la actualización de la Microzonificación Sísmica en el Municipio de Ibagué, incluyó la descripción geológica de las zonas de expansión delimitadas por el municipio.

De acuerdo con lo anterior, las unidades litológicas desde la más antigua a la más reciente, que componen la ciudad de Ibagué corresponden a:

- Neises y anfibolitas de Tierradentro (Precámbrico).
- Batolito de Ibagué (Jurásico).
- Depósitos consolidados y no consolidados (Abanico de Ibagué, conos de deyección, coluviones y aluviones).

### 2.2.4. Neises y anfibolitas de Tierradentro (PCAn/PCAa)

Esta unidad litológica aflora en el noroeste de la ciudad de Ibagué, subyaciendo al Abanico de Ibagué, específicamente sobre el predio del antiguo club de exempleados de Electrolima. Conformar una pequeña colina que sobresale unos 8m por encima del terreno con extensión de aproximadamente  $5000m^2$ . Las rocas de esta zona presentan grado de meteorización moderado, y se componen de hornblenda y plagioclasas con foliación noreste-sureste y diaclasas espaciadas entre 20cm y 1.2m.

Al noreste de la Urbanización Tierra Firme en el sector del salado, la roca metamórfica correspondiente a los esquistos anfibólicos se haya completamente meteorizada. La conforma suelos tipo arcillas limo-arenosos y limos arcillosos de color amarillo pálido y café entre 2 y 5m profundidad, intruida por diques de cuarzo y feldespatos potásicos de 30 a 80cm de espesor (Universidad de los Andes, 2020).

### 2.2.5. Batolito de Ibagué (Jcdi)

Esta unidad subyace al Abanico de Ibagué y constituye los cerros que se encuentran al sureste y norte de la ciudad de Ibagué. Tal y como fue dado a conocer en el numeral 2.1.2, el Batolito de Ibagué es una roca ígnea intrusiva afanítica<sup>2</sup>, compuesta por rocas granodioritas con

---

<sup>2</sup> Textura cristalina de grano grueso

minerales como el cuarzo, plagioclasa, feldespatos de potasio, biotita y hornblenda. El Batolito de Ibagué, en el fondo del cañón del río Combeima se encuentra de manera discontinua, aflorando ventanas y franjas, que constituyen un macizo rocoso muy duro y en estado de meteorización leve. Por otro lado, en las laderas y cerros se presenta en estado de alteración avanzado entre suelo residual y Saprolito; y en la parte media de las laderas se puede encontrar arenas arcillosas y arcillas de baja plasticidad como caolinitas, esméticas e illitas. (Espitia et al., 2003)

En la actualización de la Microzonificación Sísmica en el Municipio de Ibagué, del año 2020, se logra describir el perfil de meteorización del Batolito de Ibagué. Este se conforma principalmente por 40cm de suelo orgánico y ceniza volcánica, que es subyacente por un estrato de espesor de hasta 10m de suelo residual-Saprolito, caracterizado por arcillas limosas de color rojo y amarillo claro, de consistencia firme. Seguidamente, lo componen limos arcillosos con arenas finas y arenas finas limo-arcillosas de características erosionables y no plásticas.

A profundidades superiores a las anteriores, se encuentra una zona de suelo Saprolito-roca con meteorización moderada, compuesta por arenas medias de color blanco y oxidaciones amarillas, constituida principalmente por plagioclasas meteorizadas, biotitas, cuarzos y hornblendas. Su proporción grava/arena/fino es del 30-10/35-60/30-40%, respectivamente. Se evidencian tamaños de grano grava y bloque con diámetros de 5 m hasta 10 m. Por último, se puede encontrar la roca madre de los niveles anteriores de composición granodiorita de grano medio, constituida por cuarzo, plagioclasas, biotitas y hornblendas, con una consistencia dura y de alta resistencia a la compresión, la cual presenta fracturas de tipo diaclasas separadas en un rango variable de 40cm a 1m.

#### **2.2.6. Abanico de Ibagué (Qai)**

La unidad litológica se formó principalmente por la actividad volcánica del nevado el Tolima, que uso al cauce del Río Combeima como vía de transporte, lo anterior, data fases de actividades volcánica, periodos de erosión y acumulación de aproximadamente 200mil y 10mil años (Vergara y Moreno, 1991). Presenta espesores de más de 150m de espesor en su parte más gruesa y está conformado por intercalaciones de depósitos de flujos torrenciales, aluviales, de lodo, depósitos de flujos torrenciales, aluviales y flujos piroclásticos. Tiene superficie suavemente ondulada con inclinación promedio de 2° al este, con patrón de drenaje radial a subparalelo (Ingeominas, 1992).

La fracción gruesa se compone en un 85% de fragmentos de roca volcánica de composición andesítica, 10% de rocas metamórficas de tipo esquistos, neises y anfibolita y 5% de granodiorita (Acosta y Ramírez, 1985). En la zona urbana predomina un suelo residual blando, de granulometría limo arcillosa, arcilla limosa y limo arenoso, de hasta 10m de profundidad, y un basamento rocoso constituido por el Batolito de Ibagué de aproximadamente de 80m a 100m de profundidad que subyace y brinda apoyo al Abanico de Ibagué.

Por la acción de procesos fluviales, se creó una secuencia de capas sedimentarias superpuestas de diferentes granulometrías, extensiones y espesores. La mayor parte de la superficie del Abanico de Ibagué se compone de un suelo residual limo arenoso a arcillo arenoso de consistencia blanda entre con espesores de 1 a 10m. Subyacen niveles de arena gravosa gris, cementada o gravas compactas de constitución conglomerática, adquiriendo el Abanico un mayor grado de compacidad a medida que aumenta la profundidad.

En la zona céntrica se evidencia mayor desarrollo del suelo residual de hasta 10m, en la zona más baja de la ciudad como Picalaña y el aeropuerto Perales su desarrollo es moderado a nulo con espesores de 1m y afloran gravas, cantos y bloques. En la Figura 8, se evidencia distintos puntos en los cuales predomina el Abanico de Ibagué con diferentes contrastes geotécnicos que serán detallados a continuación.



**Figura 8.** Ubicación puntos de descripción de Abanico de Ibagué  
Fuente: Google Earth, 2020.

### **2.2.6.1. Estratigráfica Parte alta y centro de la ciudad (P1-P3)**

La estratigrafía general del centro y parte alta de la ciudad de Ibagué está conformada principalmente por una capa de suelo residual blando limo arcilloso de color amarillo pálido, seguido de arenas gravosas, areno-limosas ligeramente cohesivas, que llegan hasta aproximadamente los 10m de profundidad, ver Figura 9.



**Figura 9.** Estratigráfía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1sur – Altura 10m aprox.

**Fuente:** Google Maps, 2020.

Sobre los 10 a 25m de profundidad se logran evidenciar gravas clasto-soportadas de cantos redondeados de pómez, asociadas a flujos piroclásticos y gravas compactadas clasto-soportadas con cantos de roca volcánica y bloques. Subyace una capa de suelo de hasta 25m de profundidad conformada por lahares de flujos areno limosos y arcillosos con cantos angulares de roca de tamaño medio y grueso. Es intercalado con algunas capas de arenas medias deleznales y lodos arcillosos, ver Figura 10.



**Figura 10.** Estratigráfía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1sur – Altura 15m aprox.

**Fuente:** Google Maps, 2020.

Los lahares se conforman por cantos de rocas volcánicas andesíticas y metamórficas, matriz soportados por arenas limosas y arcillosas. Inferior a esto, se llega a niveles de gravas clasto-soportadas de hasta 10m de espesor, de compactación media, permeables y parcialmente saturadas con cerca de un 80% de cantos de roca volcánica. Luego se evidencia un conjunto de origen fluvio-volcánico compacto de gravas, cantos, bloques subangulares y bloques angulares, clasto soportadas. Lo anterior se evidencia en la Figura 11.



**Figura 11.** Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del centro de la ciudad, específicamente carrera 1B sur – Altura 30m aprox.

**Fuente:** Google Maps, 2020.

La base del Abanico de Ibagué la conformando una especie de conglomerado basal que llega hasta los aproximadamente 80m de profundidad. Después de los 80m se evidencia un macizo de roca plutónica granodiorítica de grano medio, correspondiente al Batolito de Ibagué, compuesto por plagioclasas, cuarzo, hornblenda y biotita, el cual constituye el basamento de la zona urbana de la ciudad de Ibagué.

#### **2.2.6.2. Estratigrafía del sector complejo acuático de la calle 42 con carrera 5 (P4)**

Se conforma de un estrato de 1.5m de espesor de limo arcilloso de color gris de origen lagunar, el cual es subyacente por un lahar conformado por arenas gravosas compactas de color gris oscuro, con espesores de 3m, ver Figura 12.



**Figura 12.** Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del complejo acuático de la 42 con quinta – Altura 8m aprox.  
Fuente: <https://www.elmundo.com>

### **2.2.6.3. Estratigrafía del Barrio Jordán (P5)**

El perfil estratigráfico característico del Barrio Jordán lo conforma un estrato de 1,5m de espesor de suelos areno-limosos, formados por la meteorización del depósito de lahar de hasta 5m que subyace la zona, la composición estratigráfica es similar desde el punto P4.

### **2.2.6.4. Estratigrafía del Parque Deportivo (P6)**

En los primeros 20cm de profundidad, se muestra una capa vegetal con relleno heterogéneo de arena limosa color amarillo, Luego, 1.5m de un estrato de Limo de alta plasticidad con arena de consistencia blanda y alto contenido de humedad. Posteriormente, hasta los 5m de profundidad existe un estrato de limo arenoso con grava que presente plasticidad media con números de Penetración Estándar mayores a 50 golpes/pie. Su resistencia a la compresión inconfiada es del orden de 2.45 kg/cm<sup>2</sup> y un potencial medio de expansión de acuerdo con la Tabla H.9.1-1 de la NSR-10 (Hernández, Carlos, 2018).

Por último, después de los 5m se evidencian gravas con cantos de tamaño medio a finos de color ocre, con grado de meteorización moderado a alto, seguido de cantos de tamaño medio a grueso de color grisáceo, y meteorización débil a moderada, ver Figura 13 (Universidad de los Andes, 2020).

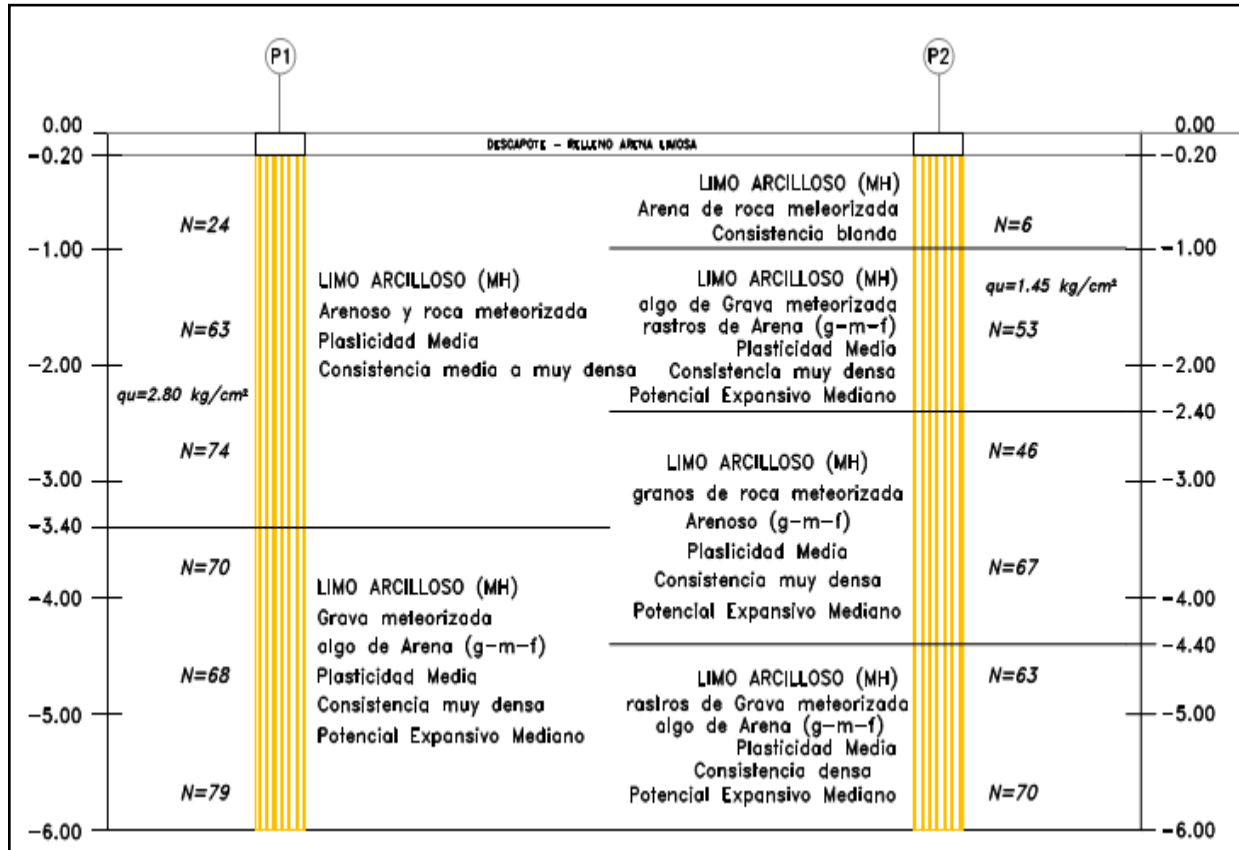


Figura 13. Estratigráfica del Abanico del Ibagué en el sector del complejo deportivo del parque deportivo – Altura 6m aprox.

Fuente: Estudio de Suelos ejecutado por el Ing. Carlos Hernández, 2018.

### 2.2.6.5. Estratigráfica del sector Los mandarinos Ambala (P7)

El barrio los Mandarinos Ambala, se constituye de un relleno antrópico que desciende en sentido de la pendiente del sector. Seguido de un depósito de hasta 3m de espesor de arenas limosas y limos arcillosos de color amarillo a ocre con un grado de meteorización alta. Posteriormente, se encuentra un suelo areno arcilloso de color café con vetas blancas y micas doradas hasta la profundidad de 6m; a partir de ahí, se evidencian variaciones en el color y expresiones de gravas de alrededor de 2 pulgadas, característico de las rocas granodioritas del Batolito de Ibagué, ver Figura 14.





**Figura 14.** Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del barrio mandarinos– Altura 4m aprox.  
Fuente: Propia, 2020.

#### **2.2.6.6. Estratigrafía del Sector Hato Viejo (P8)**

En la Figura 15 se observan arenas limosas y arcillosas de color rojizo de espesores muy variables, con intercalaciones de gravas con meteorización moderada a alta. Además, subyacen gravas muy duras compuestas de cantos y bloques en matriz de arena conglomerática.



**Figura 15.** Estratigrafía del Abanico del Ibagué en el sector del Aeropuerto – Altura 4m aprox.  
Fuente: Imagen Propia, 2020.

### 2.3. Tectónica y Neotectónica

Colombia se encuentra en una zona sometida a intensa deformación por la interacción de tres placas tectónicas; la placa del Caribe, la de Nazca y la placa Sudamericana, además del bloque Panamá al Noroccidente de Colombia (Trenkamp et al., 2002). Se estima que la placa del Caribe posee un ángulo de subducción de 17° y se extiende a una profundidad de 275km; por otro lado, la placa de Nazca tiene un ángulo de subducción de 50° y una profundidad aproximada de 500km (Hilst & Mann, 1994).

El territorio Colombiano, se caracteriza por tres cordilleras principales, las Cordilleras Occidental, Central y Oriental, que se unen en una sola cordillera en el sur del país. Las Cordilleras Occidental y Central son paralelas a la costa del Pacífico y están separadas por la Depresión Intermontaña Cauca-Patía (CPID), además la Cordillera Oriental diverge progresivamente de la Cordillera Central en dirección N-NE. La naturaleza y composición de las tres Cordilleras son sustancialmente diferentes, cada una como resultado de procesos tectónicos que afectaron al noroeste de América del sur durante el Mesozoico y Cenozoico, ver Figura 16 (Taboada et al,2000).

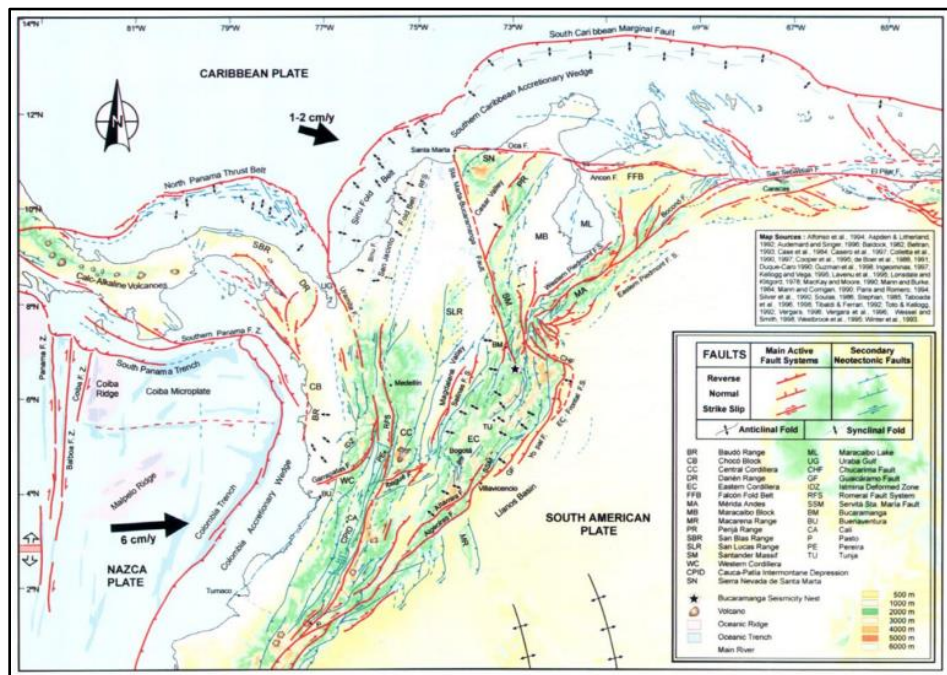
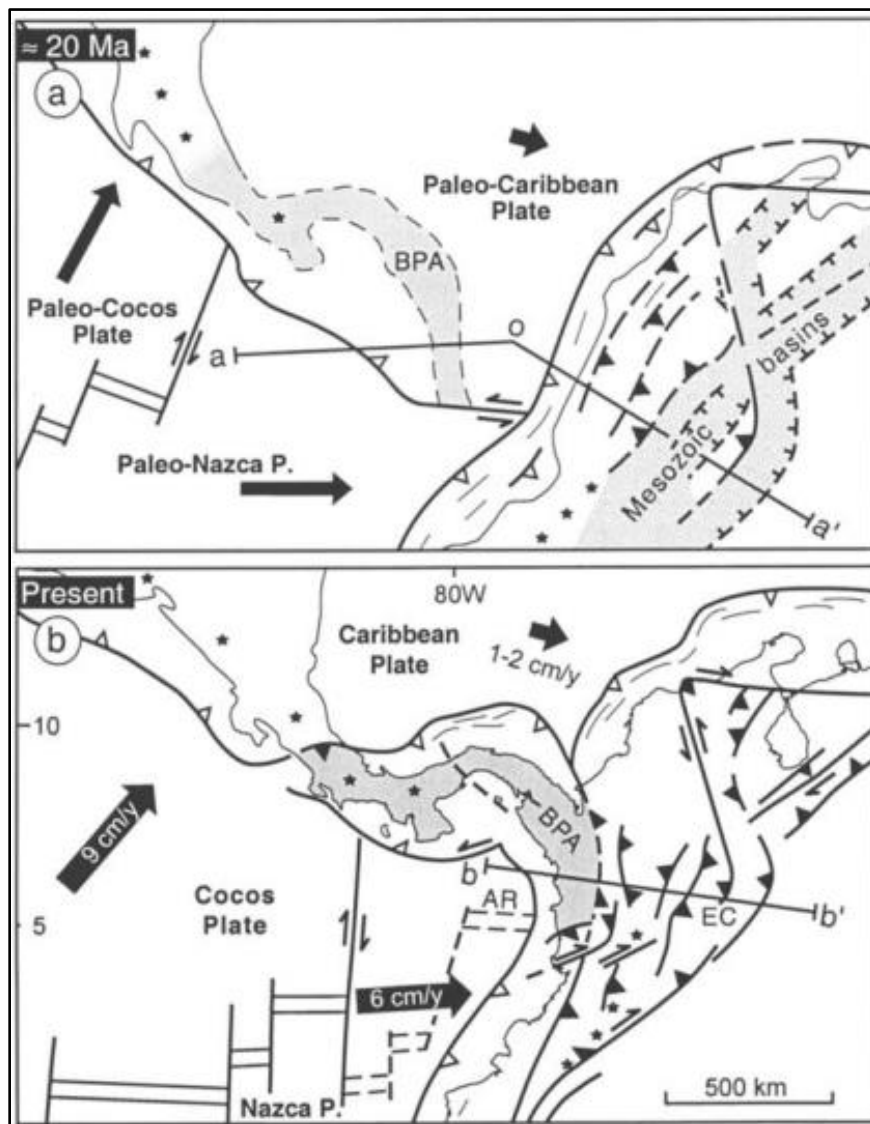


Figura 16. Mapa Neotectónico del noroeste de los Andes.  
Fuente: Taboada et al., 2000.

Como acción directa a la ciudad de Ibagué, la colisión con el Bloque de Panamá al Noroccidente de Colombia generó una reorientación de los esfuerzos tectónicos que produjo la reactivación de las fallas geológicas como el sistema de Romeral (Rfs) y la falla de Ibagué. La Figura 17 ilustra el patrón geodinámico que existía antes y después de la colisión con el Bloque

de Panamá (BPA), que se dio inicio hace aproximadamente 2 millones de años. Además, las estrellas indican la ubicación del sistema volcánico activo (Taboada et al,2000).



**Figura 17.** Esquema Neotectónico de los Andes del Norte y el Caribe, (a) 20 millones de años atrás y en (b) el presente.  
Fuente: Taboada et al.,2000.

A distancias menores a 50km se destacan el sistema de fallas de Romeral y las fallas de Ibagué, Buenos Aires, Armenia y Córdoba, como las fallas de mayor importancia por ser estructuras geológicas con actividad sísmica activa. Así mismo, a distancias mayores a los 50km de la ciudad de Ibagué se destacan las fallas de Honda, Palestina y Cucuana, siendo las tres últimas, estructuras sin rasgos sismológicos ni morfotectónicos (Paris & Machette, 2000). En la

Figura 18, se evidencia la dirección y distribución neotectónica de las principales fallas de importancia en la ciudad de Ibagué.

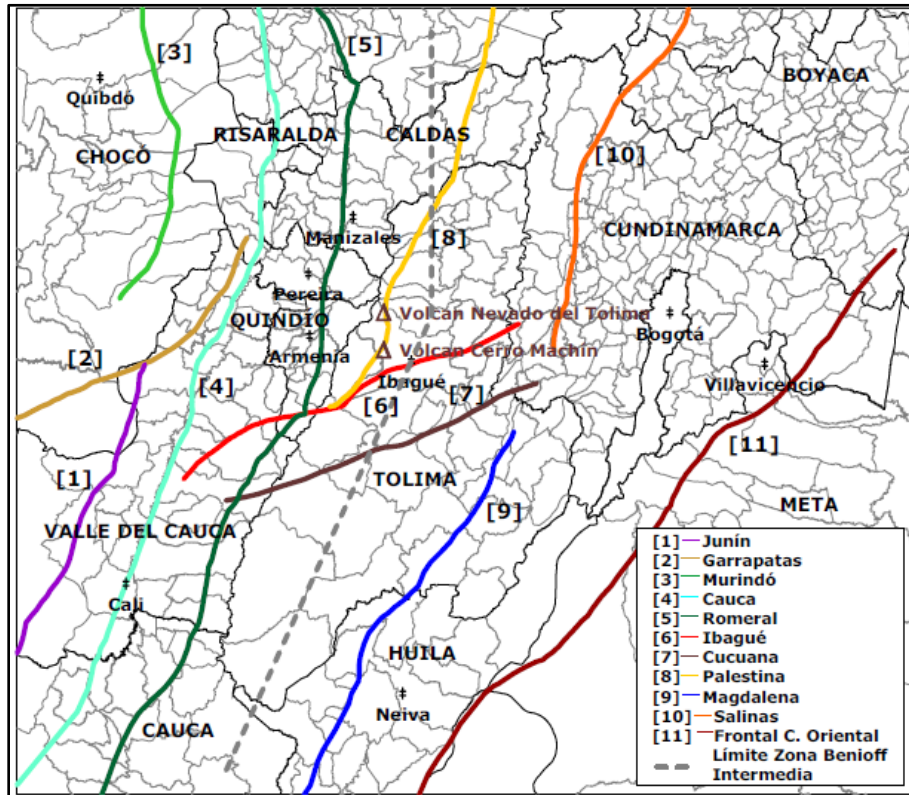


Figura 18. Principales fallas activas de importancia para la ciudad de Ibagué.

Fuente: Estudios de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué, Universidad de los Andes, 2006.

### 2.3.4. Falla de Ibagué

La falla de Ibagué es una estructura geológica activa de aproximadamente 120km de longitud desde la cima de la cordillera Central hasta el valle del Río Magdalena; su movimiento es dominante dextral lateral derecho y atraviesa la ciudad de Ibagué en dirección N 60-70° E. Se ha evidenciado que la falla desplaza todos los depósitos que constituyen el Abanico de Ibagué, lo que permitió darle la asignación de falla activa (Dierexix et al., 1987; Murcia & Vergara, 1987).

De acuerdo con el estudio Paleo sísmológico de la Falla de Ibagué, elaborado por el hoy conocido Servicio Geológico Colombiano, antiguo Ingeominas en el año 2004, se identificaron sísmos que ocurrieron entre 12.700 y 300 años antes del presente, con períodos de retorno de 1.300 años. El estudio relaciona magnitudes sísmicas del orden de  $7 \pm 1$ Ms, tasas de deformación promedio de 0.77mm/año y esfuerzos tectónicos principales máximos  $\sigma_1 = 311^\circ/18^\circ \pm 15^\circ$ ;  $\sigma_2 = 106^\circ/70^\circ \pm 15^\circ$ ;  $\sigma_3 = 209^\circ/4^\circ \pm 9^\circ$ , así mismo, se estima una magnitud máxima probable de 7.2 (Vergara, 1988, 1989).

### **2.3.5. Sistema Romeral**

El sistema de Fallas de Romeral tiene una longitud superior a los 1.000km, lo que lo hace ser uno de los mayores rasgos tectónicos del norte de Suramérica; sobre el territorio Colombiano se compone de una serie numerosa de fallas escalonadas y subparalelas.

### **2.3.6. Falla Buenos Aires**

La Falla de Buenos Aires, afecta los depósitos del Abanico de Ibagué sobre el sector de Buenos Aires en dirección N75°W, es por esta razón que su trazo atraviesa a la ciudad y es desplazada por la Falla de Ibagué, con la cual guardan una distancia de separación paralela de 200m.

### **2.3.7. Falla de Armenia**

La Falla de Armenia es una estructura geológica de tipo normal y de componente lateral izquierdo de 60km que atraviesa la ciudad de Armenia en dirección N10°E, generando como rasgo morfotectónico un escarpe de 20 m de altura, con la cara libre hacia el oriente. Los desplazamientos de los depósitos piroclásticos y lahares del glacial del Quindío evidencian la actividad Neotectónica de la falla de Armenia, por lo que es clasificada como falla activa (Ingeominas & Uniandes, 1996).

### **2.3.8. Falla de Córdoba**

La Falla de Córdoba es considerada la fuente sismogénica que generó el sismo de 6.2 Ms de enero de 1999, que afectó gravemente el eje Cafetero, generando graves daños en la ciudad de Armenia, principalmente por la distribución de las réplicas, la ubicación del epicentro y los mecanismos focales (Vergara et al., 1999). En la ciudad de Ibagué sintió el sismo con una intensidad de 5 y 7, en la escala de Mercalli.

### **2.3.9. Falla de Honda**

La Falla de Honda, se encuentra ubicada a 50km de la ciudad de Ibagué al noreste del departamento del Tolima, por el cabalgamiento del Grupo Honda sobre la formación Mesa y por el sismo de 1805 que destruyó los municipios de Honda y Mariquita, se concluye que la falla presenta actividad sísmica; su longitud es de alrededor de 45km en dirección N10°E.

### **2.3.10. Falla Palestina**

La Falla de palestina con traza de dirección N30°E, se encuentra desde cercanías del nevado del Ruiz, pasando por el noroeste de Ibagué hasta la estribación de la serranía de San Lucas, en el departamento de Antioquia; la actividad sísmica es leve, sin embargo, se tienen tasas de movimiento que van desde 0.06 y 0.4 mm/año (Collins et al., 1996)

### **2.3.11. Falla de Cucuana**

La falla de Cucuana se ubica al sur de la ciudad de Ibagué, se considera una estructura geológica de movimiento dextral con indicios de actividad neotectónica.

### **2.3.12. Falla Pan de Azúcar**

La Falla de Pan de Azúcar tiene un trazo paralelo a la Falla de Ibagué, y se considera una estructura geológica con presunta actividad sísmica.

## Capítulo III

### Caracterización Estructural de la Zona

La ciudad de Ibagué cuenta con alrededor de 530.000 habitantes, de acuerdo con el Censo Nacional de Población y Vivienda – CNPV 2018 del DANE. Cerca 492.000 habitan en la cabecera urbana y además el 26% de la población se asienta sobre las comunas 8 y 9. La comuna nueve refleja una de las menores densidades poblacionales de la ciudad con aproximadamente 6000 Hab/km<sup>2</sup> y la comuna ocho con 17000 Hab/km<sup>2</sup>; tal y como se evidencian en la Tabla 1. Densidad Poblacional por comuna (Centro de Información Municipal para la Planeación participativa - CIMPP, 2019).

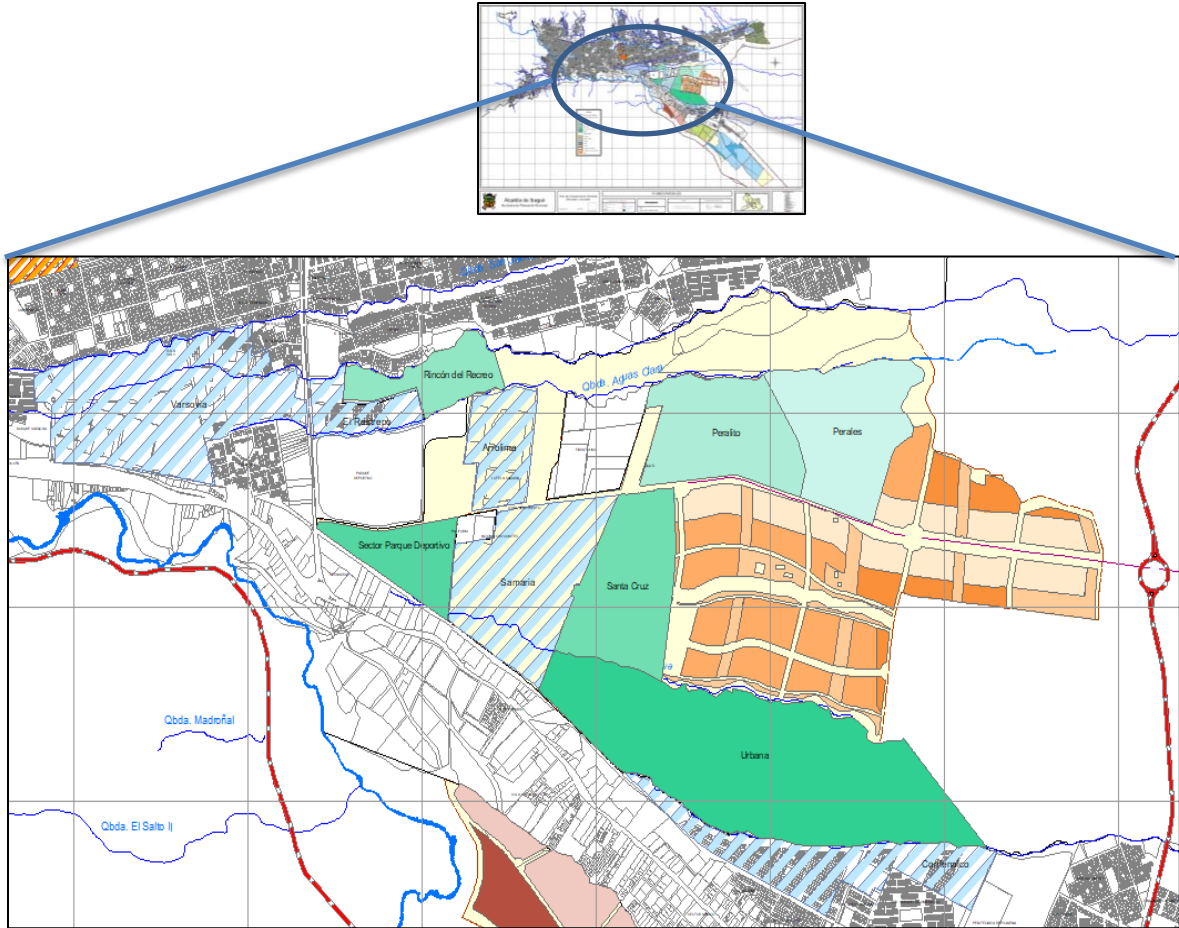
**Tabla 1.**

*Densidad Poblacional por comuna*

Comuna	Área		No. habitantes	Hab/km <sup>2</sup>
	Ha	km <sup>2</sup>		
1	253,2	2,532	31265	12347,9
2	214,2	2,142	41576	19409,9
3	244,9	2,449	24847	10145,8
4	211,9	2,119	44483	20992,4
5	181,2	1,812	30826	17012,1
6	423,8	4,238	50956	12023,6
7	525,3	5,253	44648	8499,5
8	436,8	4,368	<b><u>78106</u></b>	17881,4
9	1.069,0	10,69	<b><u>64833</u></b>	6064,8
10	250,8	2,508	45580	18173,8
11	162,5	1,625	31648	19475,7
12	210,4	2,104	43496	20673,0
13	285,8	2,858	16236	5680,9

**Fuente.** propia a partir de la proyección poblacional del establecida por el CIMPP en el mes de julio de 2019

La zona en la cual se evidencia el mayor número de edificaciones en construcción es sobre las comunas 8 y 9 ubicadas en el área de expansión oriental de la ciudad de Ibagué, tal como lo da a conocer CAMACOL en su informe Colombia Construcción en cifras del mes de abril de 2020. La Figura 19, muestra 16 planes parciales aprobados de la ciudad de Ibagué, de los cuales 11 se encuentran sobre la Zona de Expansión Oriental de la ciudad de Ibagué (Plan de Ordenamiento territorial, 2014). Lo anterior, hace que sea una de las más importantes zonas de desarrollo, crecimiento urbanístico y de infraestructura de la ciudad.

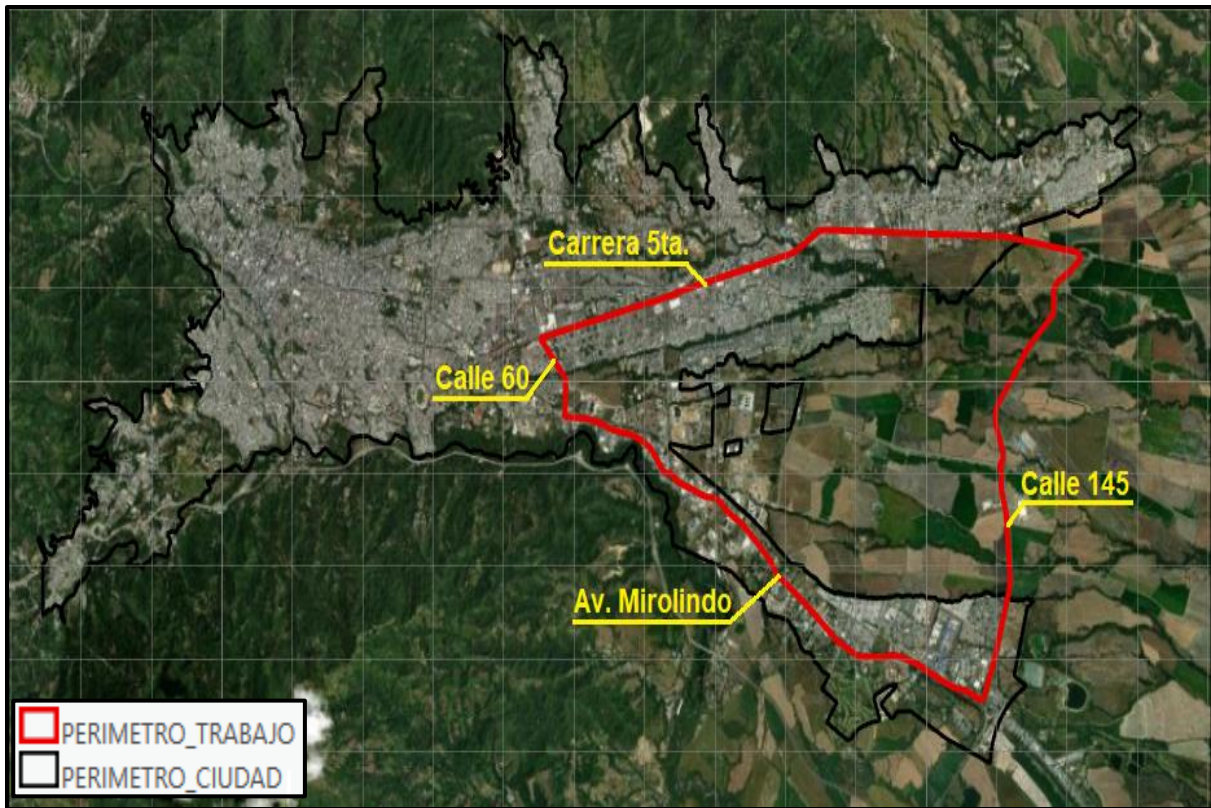


**Figura 19. Planes parciales**

Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial, 2014.

Teniendo en cuenta lo anterior, el área de trabajo para el presente proyecto es el polígono de  $21.57 \text{ km}^2$ , formado entre la carrera 5ta y Avenida Mirolindo y calles 60 y 145, con base en el Plan de Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Ibagué, aprobado según en el Decreto No. 0823 de 2014 de la Secretaría de Planeación Municipal de Ibagué, ver Figura 20.





**Figura 20.** Perímetro de trabajo – Caracterización estructural

Fuente: Propia a través de ArcGIS, Pro, 2019.

Con la finalidad de obtener una adecuada caracterización de las edificaciones residenciales, institucionales y comerciales que se encuentran sobre la zona de trabajo, se establecieron las propiedades estructurales de cada edificación. Como primera medida, se realizó la categorización por Unidades de Construcción (UC) tal y como se evidencia en la Tabla 2 y de acuerdo con lo establecido en los numerales **A.2.5.1 GRUPOS DE USO** y **H.3.1.1. CLASIFICACION DE LAS UNIDADES DE CONSTRUCCION POR CATEGORIAS** de los títulos A y H, respectivamente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10.

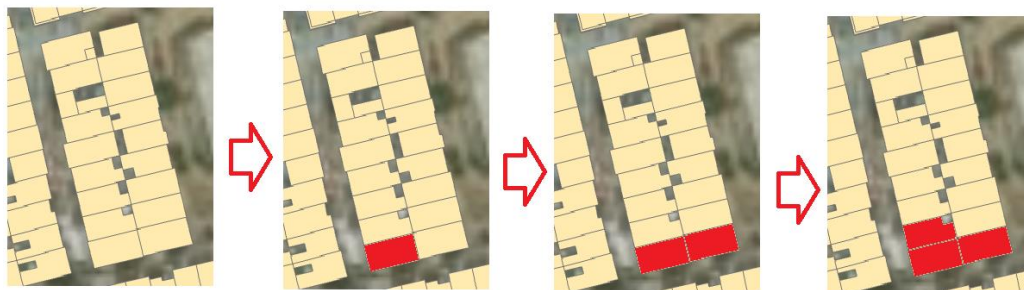
La caracterización estructural se realizó mediante el uso de diferentes herramientas; el 30% mediante visitas físicas a cada edificación (Figura 21a) y el 70% por medio del uso de fotografías aéreas Street view de Google, Google Earth y el registro del Geoportal catastral del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (Figura 21b).

**Tabla 2.**

*Clasificación de edificaciones*

TIPO	CATEROGIA	No. DE NIVELES	GRUPO DE USO
1.I	Baja	Hasta 3 Niveles	I Estructuras de Ocupación Normal
1.II			II Estructuras de Ocupación Especial
1.III			III Edificaciones de Atención a la Comunidad
1.IV			IV Edificaciones Indispensables
2.I	Media	Entre 4 y 10 Niveles	I Estructuras de Ocupación Normal
2.II			II Estructuras de Ocupación Especial
2.III			III Edificaciones de Atención a la Comunidad
2.IV			IV Edificaciones Indispensables
3.I	Alta	Entre 11 y 20 Niveles	I Estructuras de Ocupación Normal
3.II			II Estructuras de Ocupación Especial
3.III			III Edificaciones de Atención a la Comunidad
3.IV			IV Edificaciones Indispensables
4.I	Especial	Mayor de 20 Niveles	I Estructuras de Ocupación Normal
4.II			II Estructuras de Ocupación Especial
4.III			III Edificaciones de Atención a la Comunidad
4.IV			IV Edificaciones Indispensables

Fuente. propia.



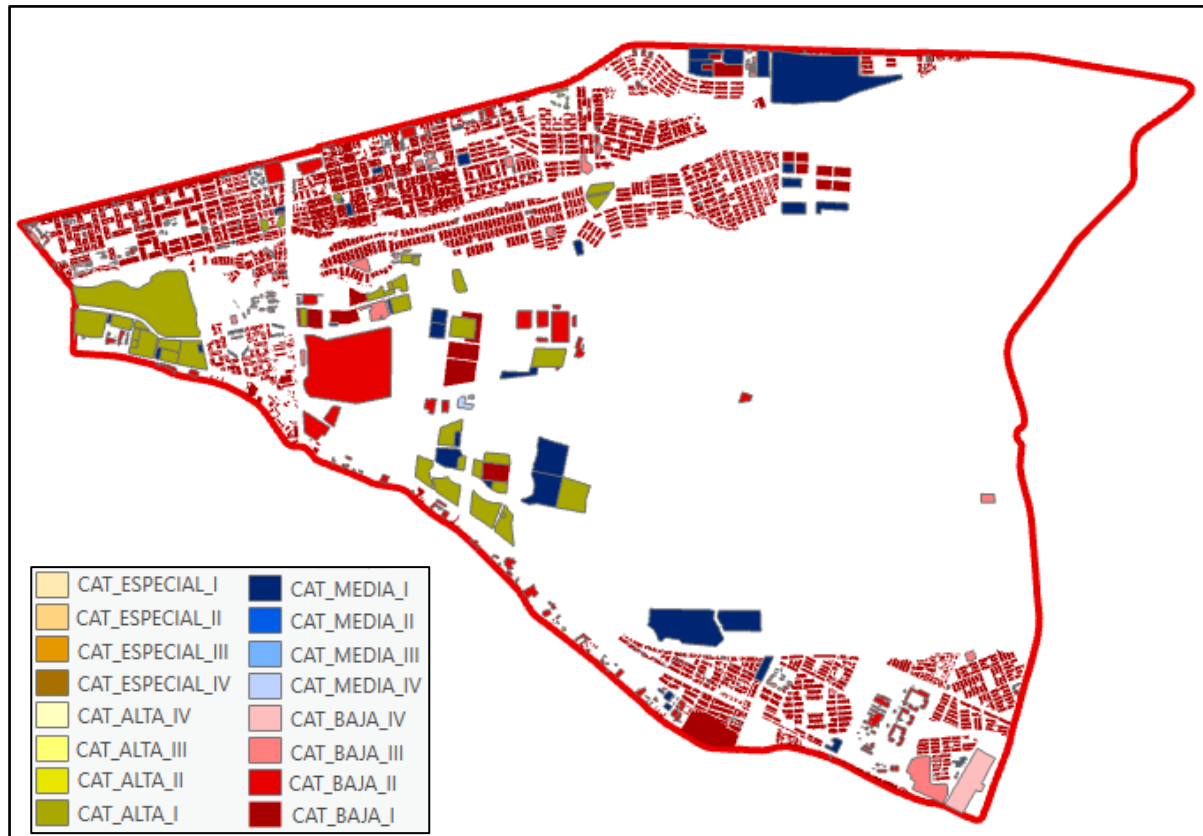
(a)



(b)

**Figura 21.** Clasificación de las unidades de construcción, edificación a edificación (a) y manzana a manzana (b)  
Fuente. Propia, con apoyo de la base catastral del IGAC a través de ArcGIS Pro, 2019.

Con la información pública de cada una de las constructoras activas en la ciudad de Ibagué, se detallaron los proyectos en venta o en proyección que las empresas ofertaban sobre la zona en estudio. Lo anterior, permitió complementar la información especialmente para los sitios aun no construidos y/o que se encuentran en etapa de licenciamiento. En la Figura 22, se evidencia de forma general, el mapa de caracterización estructural por categoría de unidad de construcción.



**Figura 22.** Caracterización estructural por categoría de unidad de construcción Esc. 1:40.000

**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020

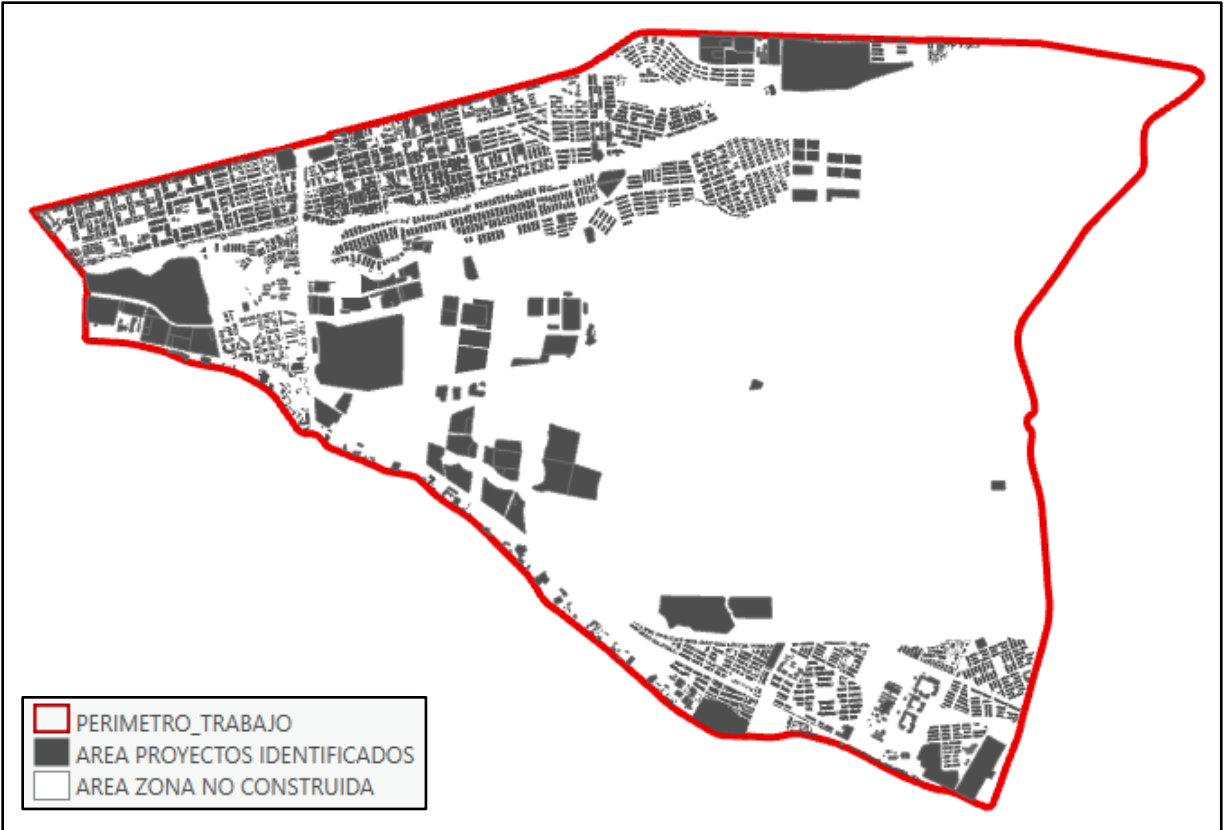
Se aforaron en total 32.658 estructuras de las cuales cerca de 98.63% corresponden a unidades de construcción de ocupación normal y en un rango menor de cerca de 1.37% corresponde a las edificaciones de ocupación especial, de atención a la comunidad e indispensables. Ahora bien, no se evidenciaron unidades de construcción de categoría Especial, lo anterior tal y como se evidencia en la Tabla 3.

**Tabla 3.***Numero de Edificaciones aforadas*

<b>TIPO</b>	<b>No. DE EDIFICACIONES</b>
1.I	31.105
1.II	241
1.III	198
1.IV	5
2.I	894
2.II	0
2.III	0
2.IV	2
3.I	213
3.II	0
3.III	0
3.IV	0
4.I	0
4.II	0
4.III	0
4.IV	0
<b>TOTAL</b>	<b>32.658</b>

Fuente propia

El área sombreada de la Figura 23, representa  $13km^2$  de caracterización de edificaciones construidas, en proceso de construcción o en etapas de aprobación de licencia urbanismo y/o construcción. Aunque no se conoce a detalle las características de los proyectos en las áreas no urbanizadas (no sombreada dentro del polígono de la Figura 23), se contempla la construcción a futuro de ciudadelas con el concepto de “Una ciudad dentro de una ciudad”. Las cuáles serán construcciones verticales para uso residencial y escenarios como iglesias, centros comerciales, parques deportivos, instituciones educativas oficiales y privadas de primaria, básica y media, entre otros.

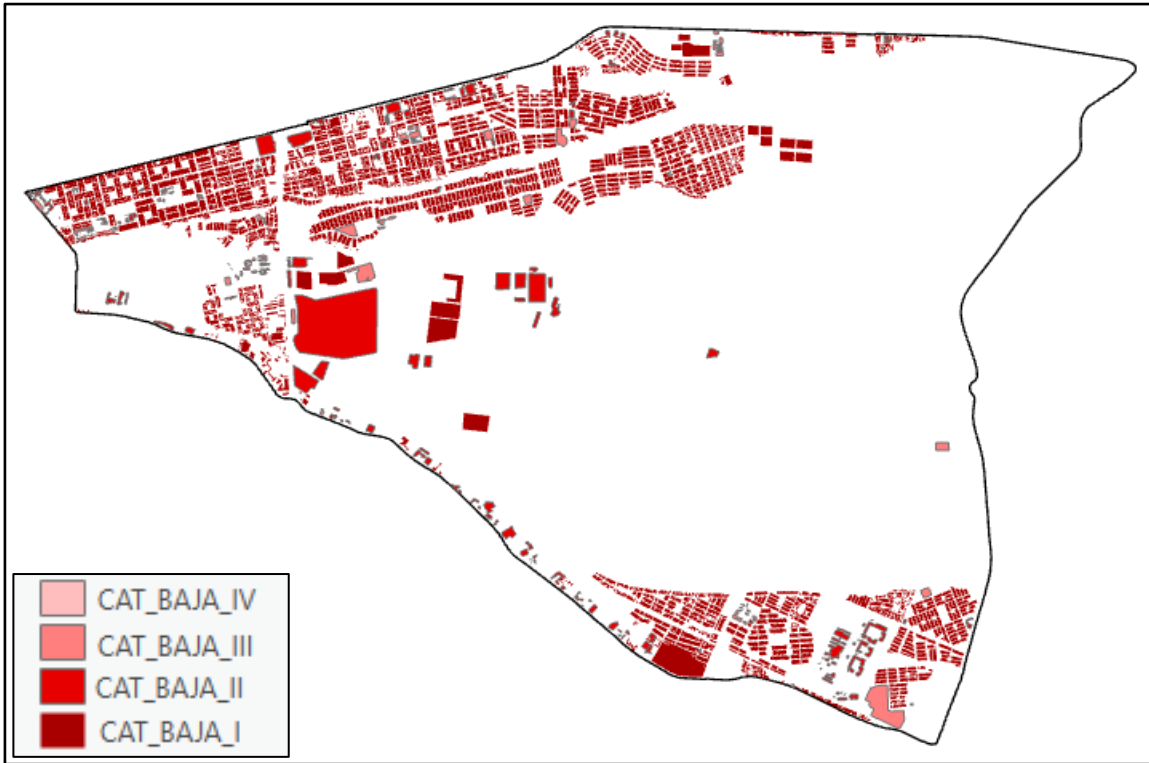


**Figura 23.** Área Caracterizada de edificaciones construidas, en construcción o proceso de licenciamiento.

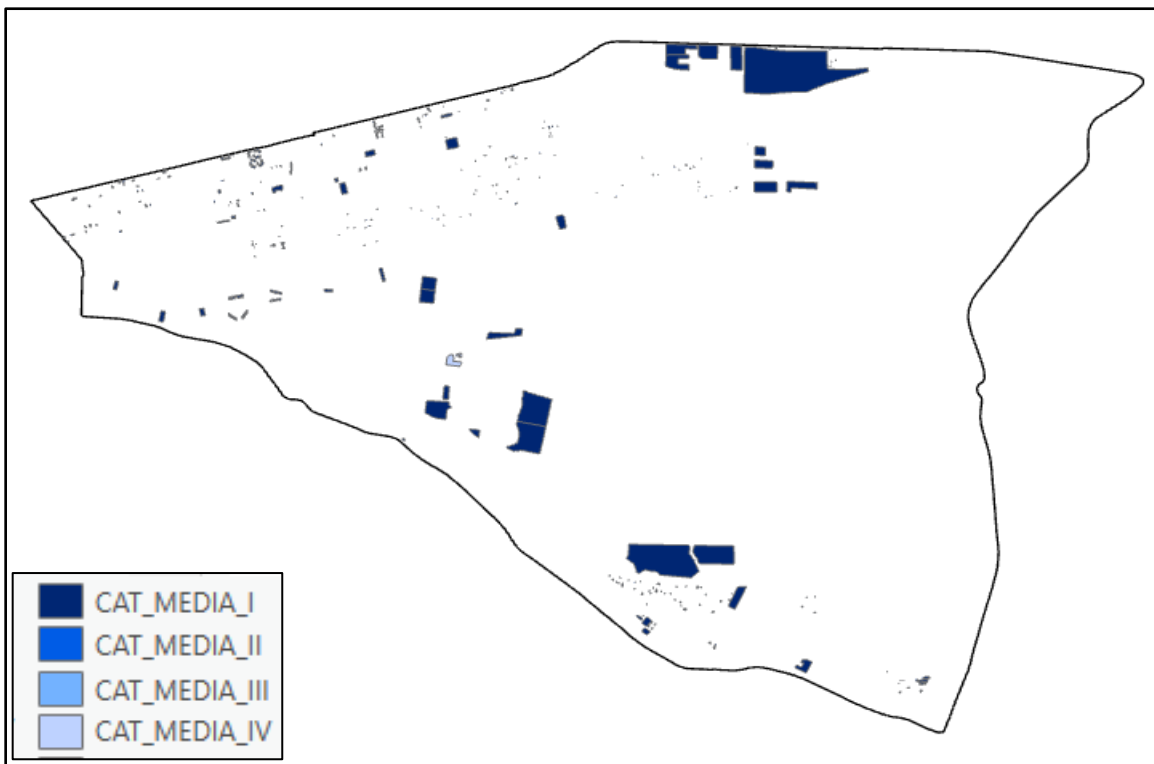
Fuente. Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020

### 3.1. Edificaciones por categorías

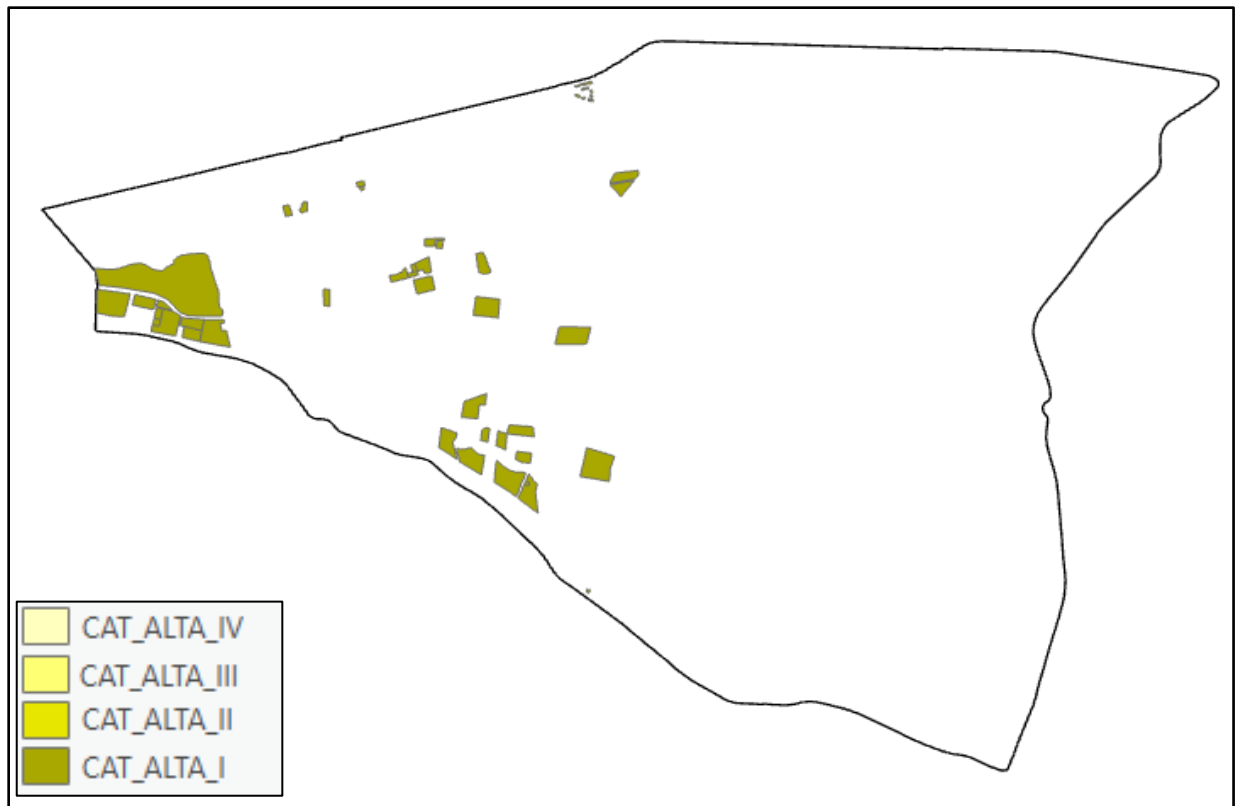
Se aforaron 31.549 unidades de construcción de las cuales 31.105 (98.59%) son de ocupación normal (1.I), 241 (0.76%) con uso de ocupación especial (1.II), 198 (0.63%) para atención a la comunidad (1.III) y 5 (0.02%) estructuras de uso indispensable (1.IV). En el caso de las edificaciones de categoría media, se clasificaron 896 edificaciones de las cuales el 99.78% es de uso de ocupación normal (2.I) y tan solo el 0.22% es de uso indispensable. Por otra parte 213 unidades de construcción son de categoría alta, de las cuales el 100% es de uso residencial y ocupación normal. Lo anterior se puede evidenciar en las figuras 24, 25 y 26, respectivamente.



**Figura 24.** Unidades de construcción de Categoría Baja (Esc. 1:42,000)  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020



**Figura 25.** Unidades de construcción de Categoría Media (Esc. 1:42,000)  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020



**Figura 26.** Unidades de construcción de Categoría Media (Esc. 1:42,000).  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020

Posteriormente, se tomaron propiedades físicas de cada estructura como son: Ubicación (Barrio), Número de niveles, Número de sótanos, Sistema Estructural y Tipo de cimentación. El tipo de cimentación fue estimado especialmente para las edificaciones construidas antes del año 1998, las cuales se construyeron sin requerimientos estructurales específicos. Para lo anterior, se indagó con habitantes de diferentes lugares de la zona de trabajo coincidiendo en que las viviendas habían sido cimentadas con dados en concreto y piedra (concreto ciclópeo) y/o vigas de cimentación. Para las edificaciones en proyección, en los cuales la información es limitada y reservada por las empresas constructoras, se optó por estimar losas como tipología de cimentación predominante en los proyectos construidos de Tipo 2.I y 3.I.

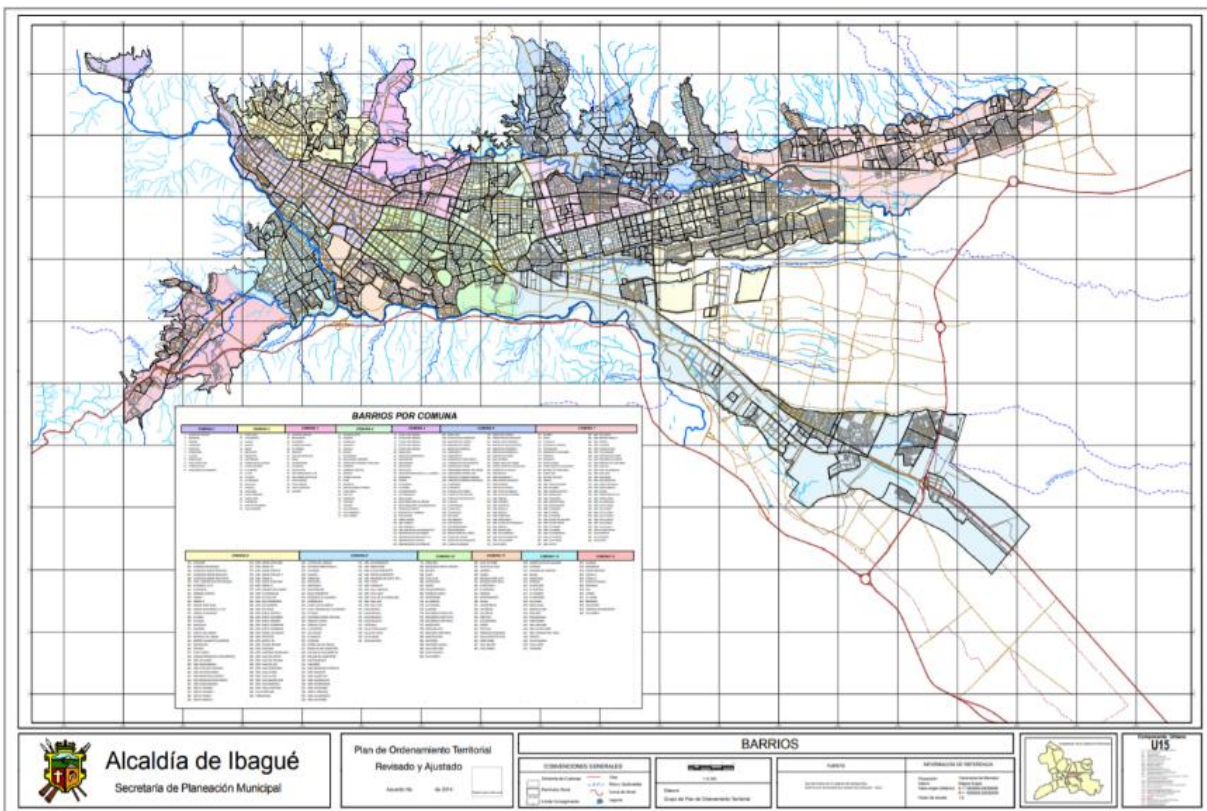
### 3.2. Propiedades físicas y estructurales

Teniendo en cuenta las características de cada una de las edificaciones aforadas, se definieron propiedades físicas y estructurales, entre ellas, barrio, número de niveles, número de sótanos, sistema estructural, tipo de cimentación; uso y periodo fundamental de vibración. A continuación, se detallan cada una de ellas.

### 3.2.1. Barrios

Por medio de lo establecido en el plano de U.15, del Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad de Ibagué (Decreto 0823 del 2014), la ciudad se compone de 445 barrios legalizados, distribuidos en sus 13 comunas (Figura 27). Sin embargo, según el centro de información municipal para planeación participativa (CIMPP), la ciudad cuenta al año 2020, con 483 barrios distribuidos como se evidencia en la Tabla 4.

El área específica de interés está constituida por las comunas 7, 8 y 9, las cuales se conforman de aproximadamente 161 barrios legalizados, correspondiente al 33.33% de los barrios de la ciudad.



**Figura 27.** Distribución comunas y Barrios de la ciudad de Ibagué  
**Fuente.** Plan de Ordenamiento Territorial, Alcaldía de Ibagué, 2014.



**Tabla 4**

*Numero Barrios por comuna de la ciudad de Ibagué*

<b>No. Comuna</b>	<b>Numero de Barrios</b>
1	13
2	27
3	18
4	24
5	32
6	64
7	82
8	82
9	57
10	24
11	23
12	23
13	14
<b>TOTAL</b>	<b>483</b>

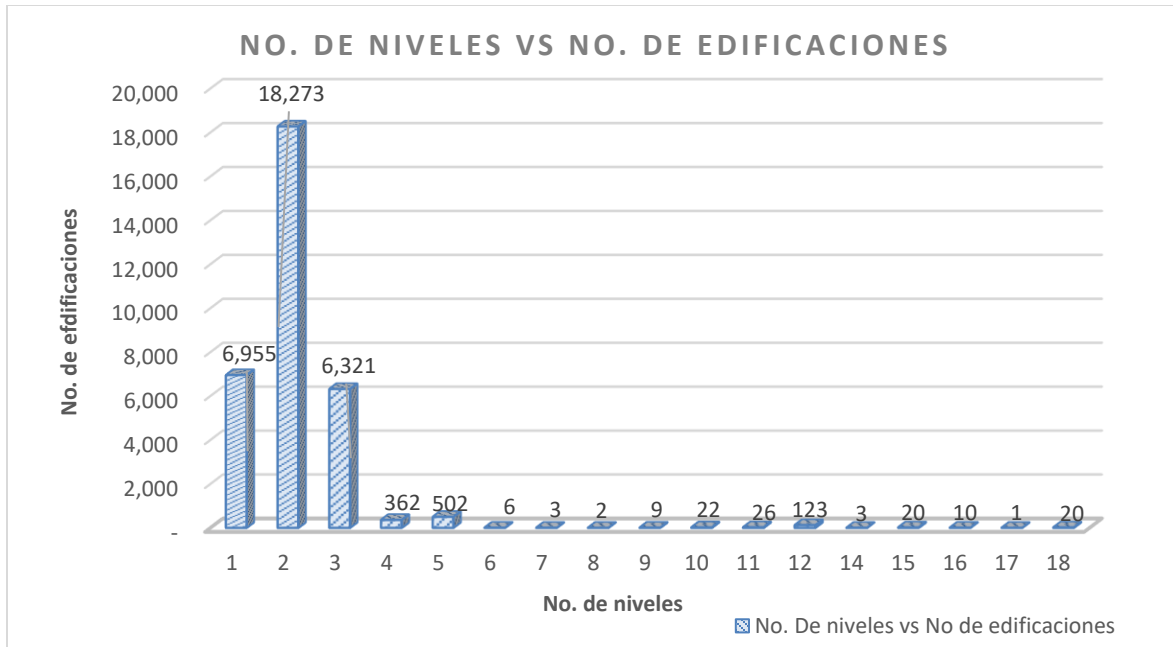
Fuente. propia con apoyo de información del CIMPP, 2012.

### **3.2.2. Numero de niveles**

En la Figura 28, se evidencia la distribución por número de niveles que se obtuvo al realizar la caracterización sobre el área entre la carrera 5ta y Avenida Mirolindo y calles 60 y 145. Las edificaciones 2 niveles son las de mayor predominancia con 18.273 unidades de construcción, seguido las edificaciones de 1 y 3 niveles. Para el caso de edificaciones de categoría media las de mayor predominancia son las de 5 niveles y para las de categoría alta las edificaciones de 12 niveles.

### **3.2.3. Número de Sótanos**

Se evidenció que 81 edificaciones tienen 1 o 2 sótanos, principalmente edificaciones de categoría alta. Lo anterior, con base en lo registrado en el Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.



**Figura 28.** Número de Niveles vs Número de Edificaciones  
**Fuente.** Propia.

### 3.2.4. Sistema estructural

Para la clasificación del sistema estructural de resistencia sísmica de las edificaciones, y teniendo en cuenta lo descrito en la NSR-10, se seleccionaron las tipologías descritas en la Tabla 5. Para las unidades de construcción de categoría Baja el sistema estructural que predomina es en mampostería confinada, principalmente por el gran número de estructuras de 1 y 2 pisos diseñadas por el Título E de la NSR-10, o en su defecto por ser la tipología estructural predominante en las edificaciones construidas antes del año 1984.

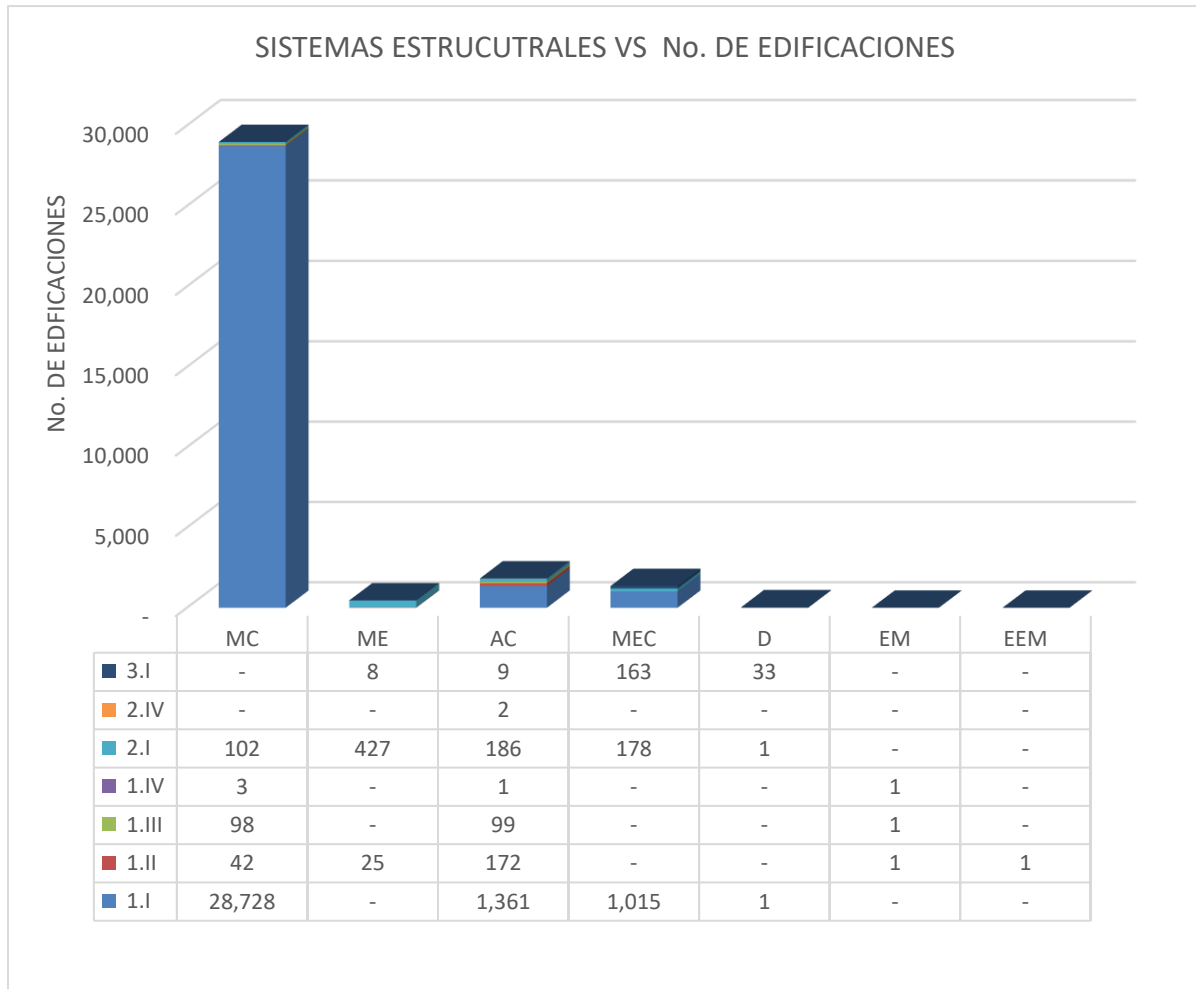
**Tabla 5**

Tipos de Sistemas Estructurales

SIMBOLO	SISTEMA ESTRUCTURAL
MC	Mampostería Confinada
ME	Mampostería Estructural
AC	Aporticado en Concreto
MEC	Muros Estructurales en Concreto
D	Sistema Estructural Dual
EM	Estructura Metálica
EEM	Estructura En Madera

**Fuente.** Propia.

En las edificaciones de categoría media especialmente en edificaciones de 4 y 5 niveles, los sistemas estructurales predominantes son mampostería y muros estructurales en concreto. Por otra parte, en las construcciones de categoría alta los sistemas estructurales más visibles son los muros estructurales en concreto y sistemas aporticados. En la Figura 29 y en el registro fotográfico del Anexo 1, se evidencia lo descrito.



**Figura 29.** Sistemas Estructurales vs Numero de Edificaciones  
*Fuente. Propia*

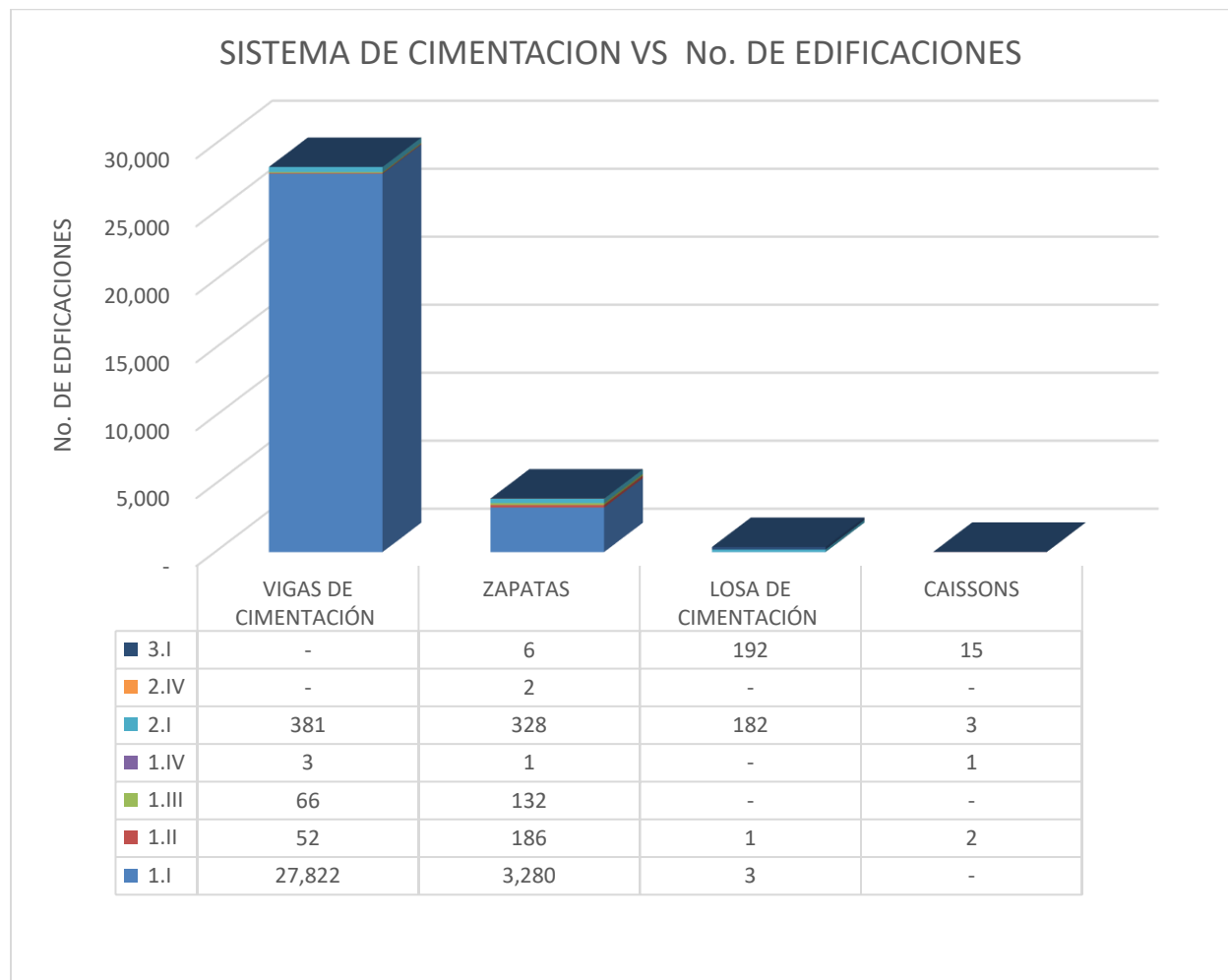
### 3.2.5. Tipo de Cimentación

Para identificar la tipología de cimentación de cada una de las edificaciones aforadas, se verificó el año de construcción de cada estructura con la finalidad de identificar los requerimientos técnicos que se exigen y/o exigen para los sistemas de cimentación. Además, se realizaron

indagaciones a propietarios sobre la historia de la edificación con el propósito de realizar la correcta asignación del tipo de cimentación.

La Figura 30, demuestra 4 tipos de cimentaciones predominantes, entre ellas, vigas de cimentaciones, zapatas, losas de cimentaciones y caissons en una menor proporción. En edificaciones de 1 y 2 niveles construidas antes de año 1998 y en las edificaciones más recientes diseñadas en mampostería confinada y estructural, bajo lo establecido en el Título E del Reglamento Colombiano de Sismoresistencia NSR-10, las vigas de cimentaciones son las de mayor prevalencia.

Las edificaciones de 4 niveles diseñadas bajo sistemas estructurales aporticados son comúnmente cimentadas en zapatas aisladas, combinadas y corridas. Además, las edificaciones de más de 4 niveles en sistemas de muros en concreto, son principalmente cimentadas bajo losas de cimentación. Por otra parte, las edificaciones de más de 10 niveles, cuando las condiciones del suelo así las requieren, se cimentan con Caissons.



**Figura 30. Sistema de Cimentación vs Numero de Edificaciones**  
**Fuente. Propia**

### 3.2.6. Uso

Otra de las propiedades físicas identificadas en la caracterización estructural, es el nivel de importancia de acuerdo con el uso de cada edificación. Se observó, que cerca del 95% de las edificaciones son de uso residencial y el 5% restante corresponde a edificaciones para uso comercial, religioso, institucional y educativo, tal y como se evidencia en la Tabla 6. En el Anexo 2, se evidencia a detalle la base de datos con cada una de las edificaciones aforadas.

**Tabla 6.**

*Tipo de uso vs No. de edificaciones*

<b>USO</b>	<b>No. DE EDIFICACIONES</b>	<b>%</b>
Comercial	327	1.00%
Residencial y Comercial	850	2.60%
Residencial	31.090	95.20%
Institucional	98	0.30%
Centros de Salud	65	0.20%
Iglesia	130	0.40%
Educativo	98	0.30%
<b>Total</b>	<b>32.658</b>	

Fuente: Propia.

### 3.3. Periodo fundamental de vibración

Aunque se conoce las características básicas de las edificaciones, se desconoce a detalle la geometría y propiedades en su sistema estructural de resistencia sísmica (masas, rigideces, deflexiones y fuerzas horizontales), lo que impide el cálculo del periodo de vibración exacto. Sin embargo, haciendo uso de lo establecido en el numeral A.4.2, del título A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente (ecuación 4), se determinó del periodo fundamental de vibración aproximado de cada edificación.

$$T_a = C_t * h^\alpha \quad (4)$$

Donde,

$T_a$  = Periodo fundamental de vibración aproximado.

$C_t$  y  $\alpha$  = Parametros,  $f$ (tipo de sistema estructural).

$h$  = Altura del edificio, medido desde la base de la edificación.

Para la determinación de los parámetros  $C_t$  y  $\alpha$ , se implementó lo establecido en el Numeral A.4.2.1 del Título A de la NSR-10, relacionado en la Tabla 7.

**Tabla 7.**

*Parámetros  $C_t$  y  $\alpha$  según sistema estructural*

TIPO	SISTEMA ESTRUCTURAL DE RESISTENCIA SISMICA	$C_t$	$\alpha$
1	Pórticos resistentes a momento de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas	0.047	0.90
2	Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas	0.072	0.80
3	Pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo	0.073	0.75
4	Todos los otros sistemas estructurales basado en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería	0.049	0.75
5	Alternativamente, para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, pueden emplearse los siguientes parámetros $C_t$ y $\alpha$ , donde $C_w$ se calcula utilizando la ecuación	$\frac{0.0062}{C_w}$	1.00

Fuente: Tabla A.4.2-1 del título A, NSR-10.

De acuerdo con lo anterior, se evidenció que en las edificaciones de categoría Baja presentan periodos de vibración que varían desde 0.10s hasta 0.36s. En las edificaciones de categoría media rondan desde aproximadamente 0.28s a los 0.89s y en las edificaciones de categoría alta van desde 0.56s hasta 1.5s. Las tablas 8, 9 y 10, muestran de manera completa la distribución de los periodos de vibración fundamental aproximados y máximos permitidos, estos últimos, según el Título A de la NSR-10, tal y como se muestra a continuación:

$$T = T_a * C_u$$

Donde,

$T$  = Periodo Fundamental de vibración máximo permitido

$C_u$  = Coeficiente utilizado para calcular  $T = 1.75 - 1.2A_vF_v$

$A_v$  = Velocidad horizontal Pico Efectiva = 0.2

$F_v$  = Coeficiente de Amplificación de la Velocidad Pico Efectiva = 1.6

**Tabla 8.***Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Baja*

<b>TIPO</b>	<b>Ta</b>	<b>T</b>	<b>No. DE NIVELES</b>	<b>SISTEMA ESTRUCTURAL</b>	<b>No. DE EDIFICACIONES</b>
	<b>s</b>	<b>s</b>			
<b>1.I</b>	0.1003	0.137	1	MC	6625
	0.1187	0.1622	1	AC	42
	0.1187	0.1622	1	D	1
	0.1687	0.2305	2	MC	17003
	0.1687	0.2305	2	MEC	880
	0.2215	0.3026	2	AC	246
	0.2287	0.3124	3	MC	5100
	0.2287	0.3124	3	MEC	135
	0.3191	0.4359	3	AC	1073
<b>1.II</b>	0.1003	0.137	1	MC	19
	0.1003	0.137	1	ME	14
	0.1111	0.1517	1	AM	1
	0.1117	0.1526	1	MC	12
	0.1117	0.1526	1	ME	1
	0.1187	0.1622	1	AC	38
	0.1254	0.1713	1	ME	7
	0.1254	0.1713	1	MC	6
	0.1263	0.1726	1	AC	2
	0.1386	0.1893	1	MC	3
	0.1451	0.1982	1	AC	35
	0.1637	0.2236	1	AC	20
	0.1687	0.2305	2	MC	2
	0.1687	0.2305	2	ME	3
	0.2215	0.3026	2	AC	75
	0.2609	0.3564	2	EM	1
0.3191	0.4359	3	AC	2	
<b>1.III</b>	0.1003	0.137	1	MC	78
	0.1187	0.1622	1	AC	46
	0.1687	0.2305	2	MC	20
	0.2215	0.3026	2	AC	43
	0.3191	0.4359	3	AC	10
	0.3609	0.493	3	EM	1
<b>1.IV</b>	0.1499	0.2047	1	EM	1
	0.1003	0.1370	1	MC	3
	0.1187	0.1622	1	AC	1

Fuente: Propia.

**Tabla 9.***Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Media*

<b>TIPO</b>	<b>Ta</b> <b>s</b>	<b>T</b> <b>s</b>	<b>No. de</b> <b>Niveles</b>	<b>Sistema Estructural</b>	<b>No. de</b> <b>Edificaciones</b>
<b>2.I</b>	0.4267	0.5829	4	AC	129
	0.2838	0.3876	4	MC	97
	0.2838	0.3876	4	ME	48
	0.2838	0.3876	4	MEC	88
	0.3355	0.4583	5	MC	5
	0.3355	0.4583	5	ME	379
	0.3355	0.4583	5	MEC	72
	0.5216	0.7125	5	AC	46
	0.6146	0.8395	6	AC	6
	0.7061	0.9645	7	AC	2
	0.4772	0.6519	8	MEC	2
	0.5213	0.7121	9	MEC	5
	0.8853	1.2093	9	AC	3
	0.5642	0.7707	10	MEC	11
	0.6123	0.8365	10	D	1
<b>2.IV</b>	0.6841	0.9345	7	AC	1
	0.8577	1.1717	9	AC	1

Fuente: Propia.

**Tabla 10.***Periodos de vibración fundamental de edificaciones de categoría Alta*

<b>TIPO</b>	<b>Ta</b> <b>s</b>	<b>T</b> <b>s</b>	<b>No. DE</b> <b>NIVELES</b>	<b>Sistema Estructural</b>	<b>No. De</b> <b>Edificaciones</b>
<b>3.I</b>	0.885	1.209	11	AC	1
	0.612	0.836	11	D	4
	0.973	1.33	11	AC	2
	0.564	0.771	11	ME	6
	0.658	0.898	11	D	6
	0.606	0.828	11	ME	2
	0.606	0.828	11	MEC	9
	0.647	0.884	12	MEC	115
	0.7021	0.959	12	D	3
	0.726	0.992	14	MEC	9
	0.765	1.045	15	MEC	15
	0.83	1.134	15	D	5
	1.486	2.03	16	AC	6
	0.803	1.096	16	MEC	8
	0.871	1.19	16	D	1
	0.84	1.147	17	MEC	1
	0.877	1.198	18	MEC	6
	0.952	1.3	18	D	14

Fuente: Propia.



### 3.4. Clasificación de las tipologías estructurales

De acuerdo con las propiedades y características físicas que se definieron previamente; se estableció, que las edificaciones de dos niveles en mampostería confinada cimentadas sobre vigas de cimentación y/o zapatas son las predominantes en las unidades de construcción de categoría baja. Además, las edificaciones de cinco niveles construidas sobre vigas de cimentación y mampostería estructural son las de mayor prevalencia entre las unidades de categoría de construcción media. Por último, las unidades de 12 niveles construidos en muros estructurales en concreto (industrializados) cimentados sobre losas de cimentación son las predominantes en las unidades de construcción de categoría alta (Ver Tabla 11).

**Tabla 11.**

*Tipos de edificaciones predominantes según categoría de construcción*

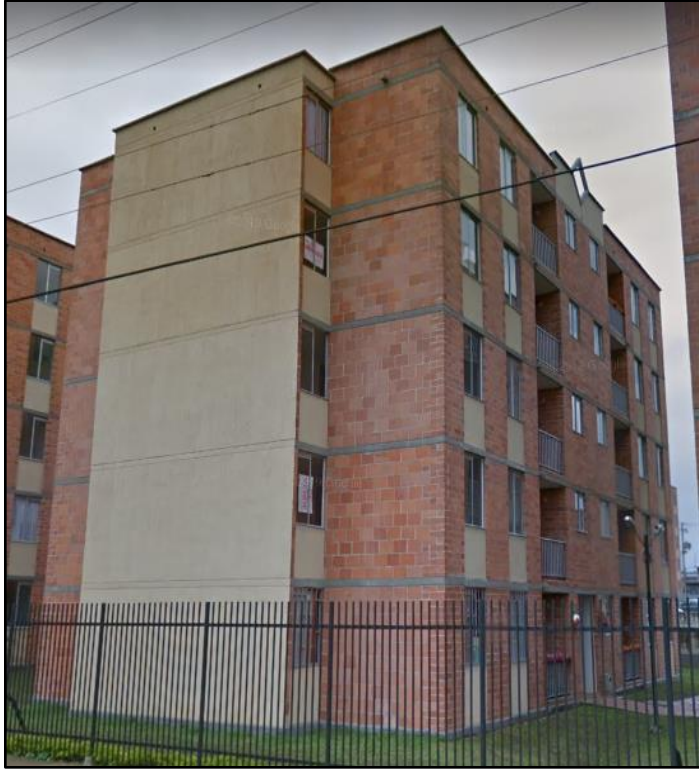
<b>Cat. Unidad de construcción</b>	<b>No. Niveles</b>	<b>Sistema de Resistencia Estructural</b>	<b>Tipo de cimentación</b>
Baja	2	Mampostería confinada	Vigas de cimentación y/o zapatas
Media	5	Mampostería estructural	Vigas de cimentación
Alta	12	Muros Estructurales en concreto	Losas de cimentación

Fuente: Propia.

En las figuras 31-33 se muestra el registro fotográfico de las edificaciones anteriormente mencionadas, para las unidades de construcción baja, media y alta, respectivamente.



**Figura 31.** Edificaciones típicas de categoría Baja  
Fuente. Google Maps, 2020.



**Figura 32.** Edificaciones típicas de categoría Media  
**Fuente.** Google Maps,2020.



**Figura 33.** Edificaciones típicas de categoría Alta  
**Fuente.** Google Maps,2020.

## Capítulo IV

### Caracterización Geotécnica de la Zona

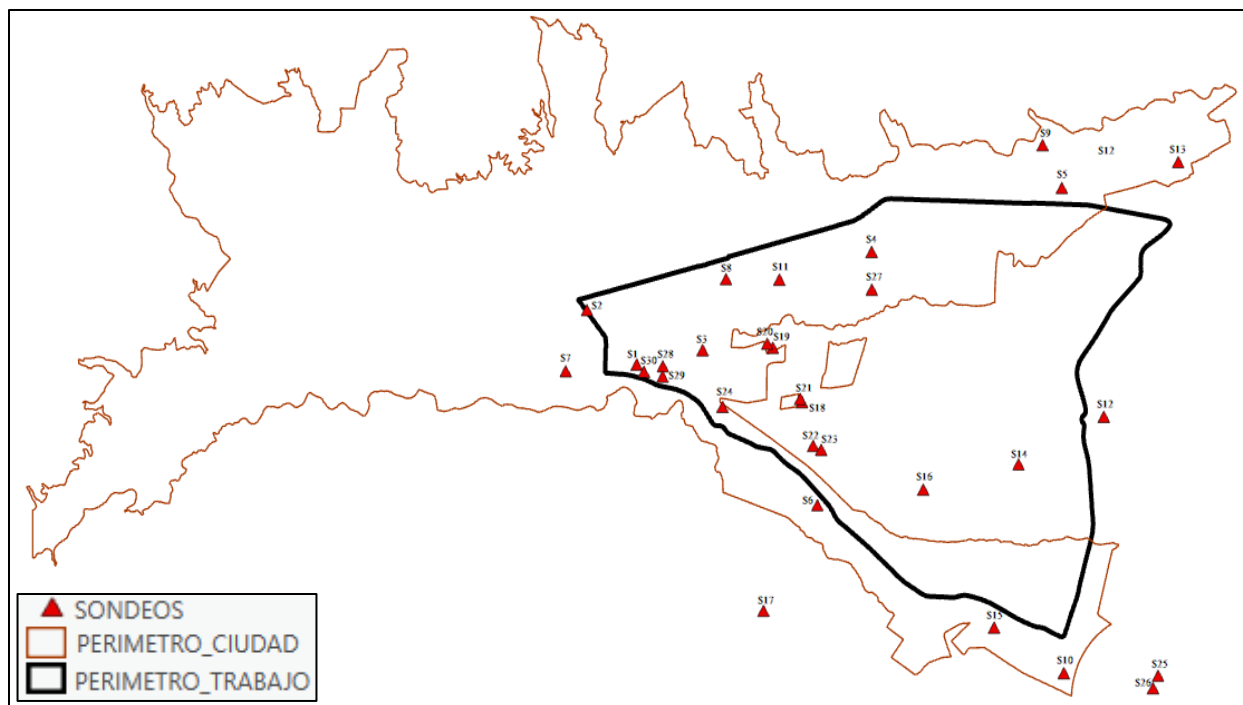
Conocer la geología de la zona de interés es el primer paso para identificar las posibles amenazas sísmicas que tendrá la ciudad. Sin embargo, a través del tiempo, por agentes exógenos o endógenos se generan procesos geológicos, que desintegran o descomponen la roca convirtiéndola en suelo. De acuerdo con lo evidenciado en el capítulo III, las profundidades sobre las cuales se desplantan las cimentaciones superficiales de las edificaciones construidas, en construcción y proyectadas de la ciudad de Ibagué, son sobre los primeros 10m de profundidad. Por tal motivo, es de vital importancia conocer las propiedades geomecánicas y comportamiento estático y dinámico de cada uno de los suelos.

Al generarse un movimiento sísmico, se produce la liberación de energía de deformación almacenada, por medio ondas sísmicas que viajan a través del campo libre (suelo) y dependiendo de las características del estrato se va produciendo amplificación o atenuación que modifican el contenido frecuencial de la señal (Abascal, et al., 2000). Es por esto, que es necesario, la identificación del comportamiento geotécnico de los suelos, la distribución de los perfiles estratigráficos y las propiedades dinámicas de cada estrato frente a una excitación sísmica.

#### 4.1. Recopilación de Información Existente

Como primera medida, se realizó la recolección de información disponible de estudios geotécnicos que se han llevado a cabo en la ciudad de Ibagué. La información fue solicitada a empresas constructoras y de diseño de la ciudad, curadurías municipales y a la Secretaría de Gestión del Riesgo de la Alcaldía de Ibagué. Como resultado de la investigación y recolección de datos se obtuvo un registro de 114 estudios geotécnicos proyectados sobre la ciudad de Ibagué. Con lo anterior, se realizó la revisión exhaustiva de cada uno de los estudios, donde se encontraron diferentes inconsistencias principalmente en la metodología y procedimiento de las exploraciones y las profundidades finales de los sondeos. Es por esto, que se optó por considerar únicamente exploraciones con profundidades mayores a los 6m.

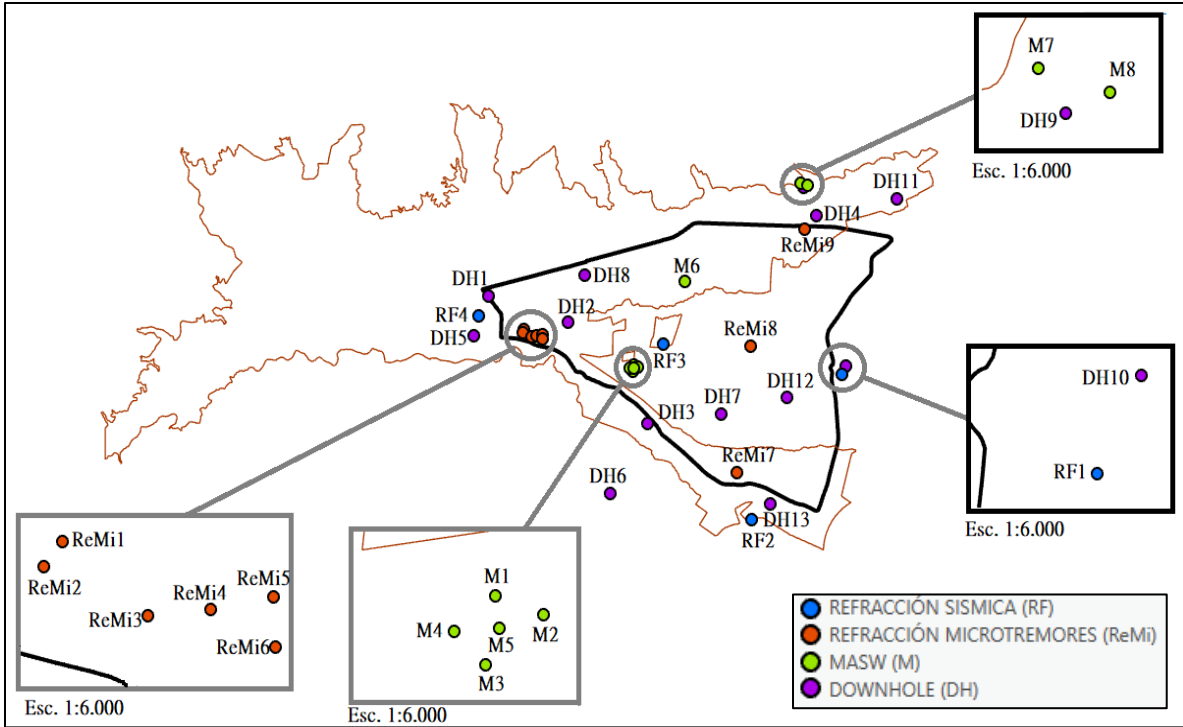
Adicionalmente, se hizo uso de la información geotécnica implementada en la Microzonificación Sísmica de Ibagué realizada por la Universidad de los Andes en el año 2006, de la cual se tomaron 5 exploraciones ubicadas sobre el área en estudio. En total, se contó con informaciones de 30 exploraciones localizados tal y como se muestra en la Figura 34. El anexo 3 contiene las características y georreferenciación de cada uno de los sondeos.



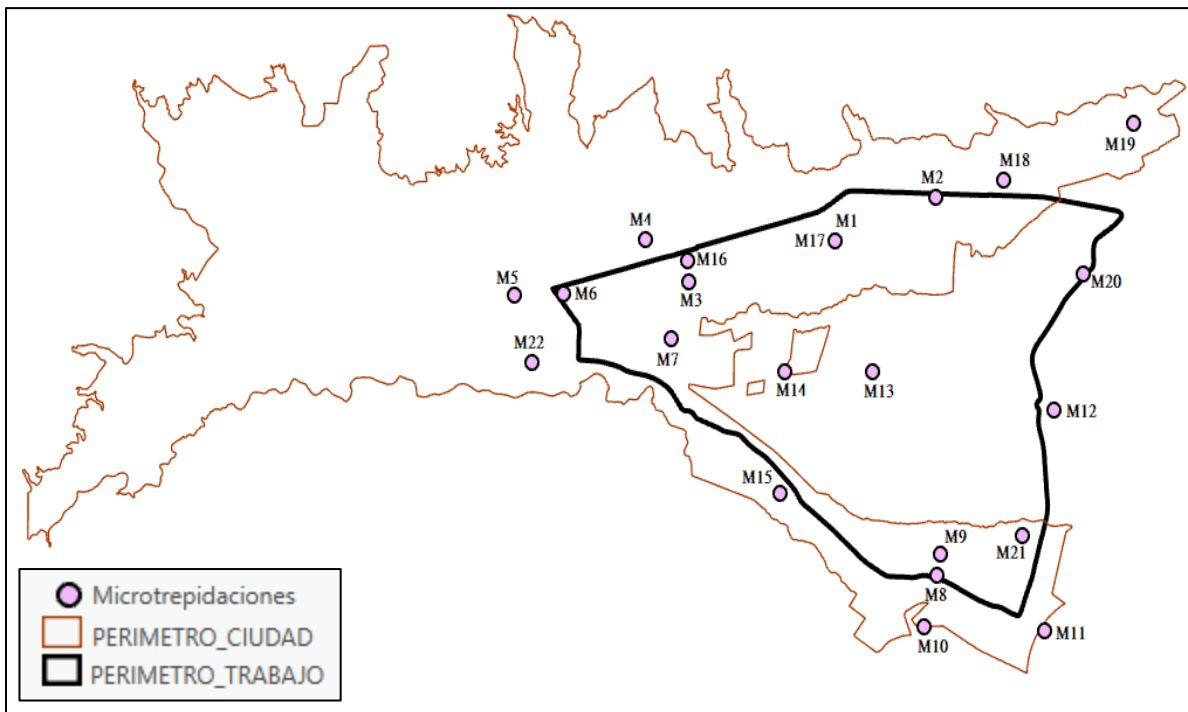
**Figura 34.** Localización de Sondeos utilizados Esc 1:70.000.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

De cada una de las exploraciones, se tomó la información de las propiedades físicas y mecánicas, entre ellas, el perfil estratigráfico con la descripción de cada suelo encontrado, humedades naturales, granulometrías, límites de plasticidad y consistencia y parámetros de resistencia al corte realizadas en 10 sondeos. Además, se obtuvo información de 13 ensayos DownHole, 9 ensayos de refracción Microtremores (ReMi), 9 ensayos de Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW) y 4 refracciones sísmicas, ubicadas como se evidencia en la Figura 35.

Complementando la información anterior, con la colaboración de la Secretaría de Gestión del Riesgo de la Alcaldía de Ibagué, se obtuvo la información de 56 microtrepidaciones realizados en la ciudad, de los cuales, 22 fueron llevados a cabo cerca o dentro del polígono de trabajo. En la Tabla 12, se evidencian los periodos y frecuencias fundamentales de vibración del depósito en diferentes puntos de la ciudad, ver Figura 36.



**Figura 35.** Localización ensayos geofísicos Esc. 1:60,000.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.



**Figura 36.** Localización microtremores.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

**Tabla 12.***Información General Microtremores*

<b>No.</b>	<b>Frecuencia Hz</b>	<b>Periodo s</b>
<b>1</b>	8.33	0.1200
<b>2</b>	5.55	0.1802
<b>3</b>	9.09	0.1100
<b>4</b>	5.88	0.1701
<b>5</b>	9.09	0.1100
<b>6</b>	16.60	0.0602
<b>7</b>	6.66	0.1502
<b>8</b>	6.66	0.1502
<b>9</b>	6.36	0.1572
<b>10</b>	6.53	0.1532
<b>11</b>	6.77	0.1478
<b>12</b>	14.12	0.0708
<b>13</b>	13.09	0.0764
<b>14</b>	16.50	0.0606
<b>15</b>	9.24	0.1082
<b>16</b>	2.14	0.4666
<b>17</b>	8.31	0.1204
<b>18</b>	1.85	0.5408
<b>19</b>	15.15	0.0660
<b>20</b>	16.56	0.0604
<b>21</b>	14.88	0.0672
<b>22</b>	2.09	0.4778

Fuente. Propia

Se requiere establecer las propiedades dinámicas de los suelos sobre la zona de trabajo, para así definir el coeficiente amortiguamiento y módulo de corte dinámico a diferentes rangos de deformación, y obtener las curvas de comportamiento dinámico. Para ello, se hizo uso de la información que reposa sobre el estudio de Microzonificación sísmica de Ibagué en el año 2006, la cual consta de 3 ensayos triaxiales cíclicos con deformación controlada, 3 ensayos de columna resonantes y 2 ensayos de Bender Element.

## 4.2. Propiedades Geomecánicas de los suelos

Con base en la información obtenida se identificó y correlacionó las propiedades mecánicas, como lo son la distribución granulométrica, límites y parámetros de resistencia al corte. Además, se identificó el comportamiento de las propiedades dinámicas a lo largo del polígono de trabajo.

### 4.2.1. Distribución Granulométrica

Las distribuciones granulométricas de los suelos que subyacen la zona de trabajo, tienen características similares a lo largo de la profundidad. En la Figura 37, se puede evidenciar que en cercanías con la calle 60 (S1, S28, S29, S21 y S18), los porcentajes de partículas de tamaños a mayores al tamiz No. 4, oscilan entre 0% y 13%. En cercanías con la calle 89 (S22, S23 y S16), se pueden encontrar porcentajes que van desde 0% al 50% y en la parte nororiental del polígono de trabajo, en cercanía con la calle 145 (S12), alcanzan valores superiores al 50% aumentando en profundidad.

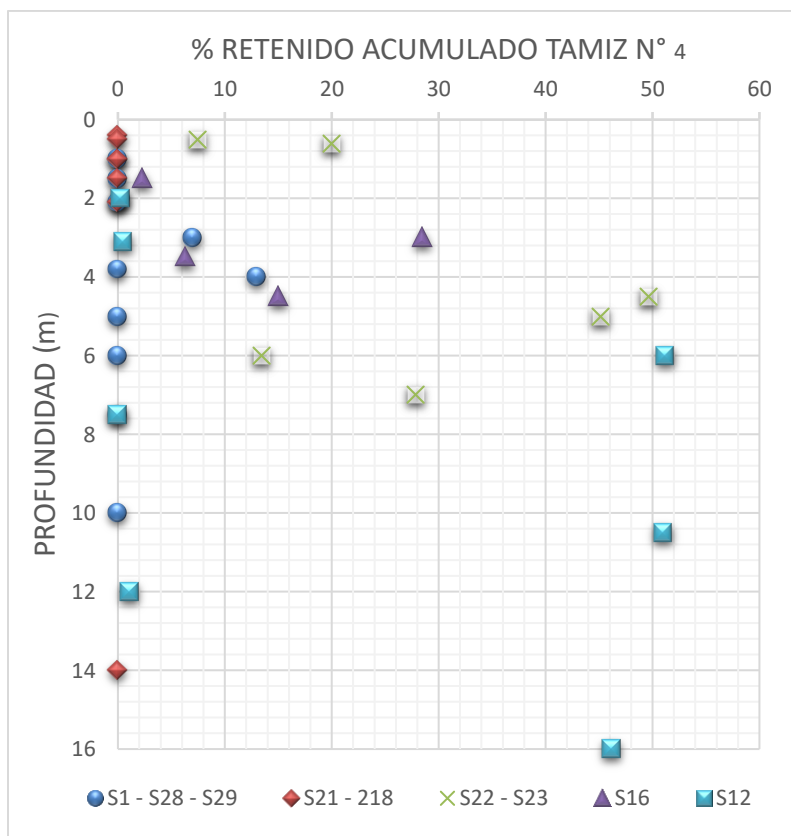
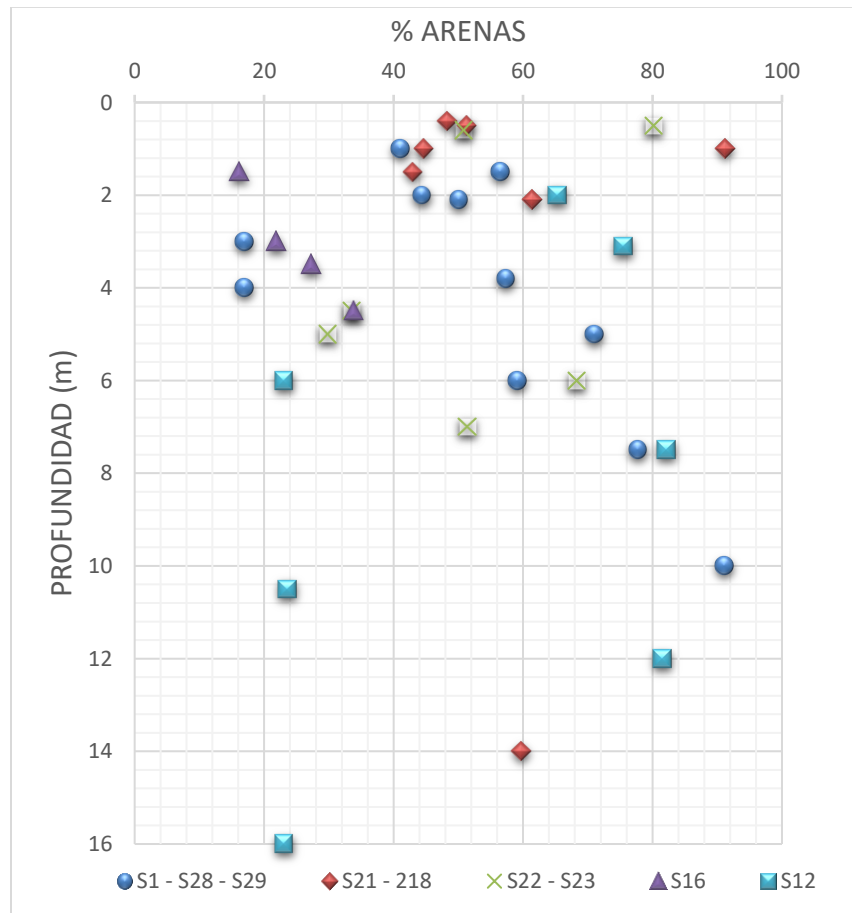


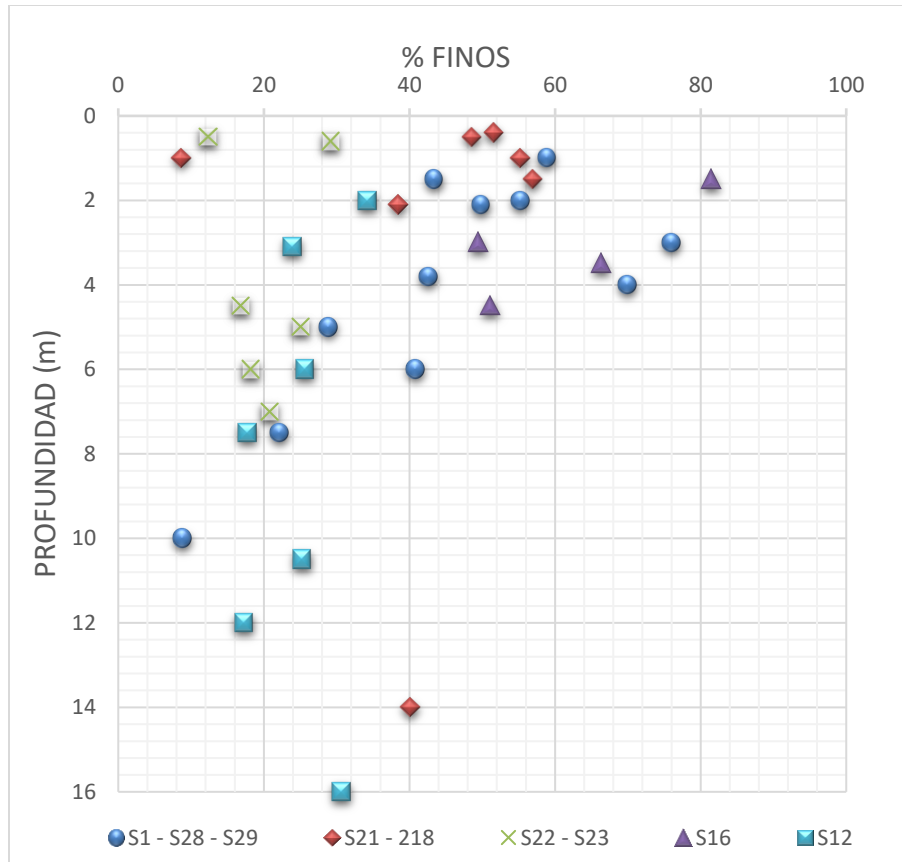
Figura 37. % Gravas vs Profundidad  
Fuente. Propia

Las partículas que pasan el tamiz No. 4 y son retenidas en el tamiz No.200, son las más representativas en la zona noroccidental del polígono de trabajo. En la Figura 38, se logra evidenciar porcentajes que van desde 16% hasta cerca del 90% de manera creciente con respecto a la profundidad. Por otra parte, la Figura 39 muestra que el porcentaje de finos presenta una distribución decreciente tanto en profundidad como en la pendiente del terreno; es decir, sobre la zona de mayor altitud se evidencia mayores porcentajes de finos con relación a la zona de menor altitud. En cercanías con la calle 60, los porcentajes de pasa No. 200, oscilan entre 58% y 21%, sobre la calle 89 se pueden encontrar porcentajes que van desde 65% al 12% y en la parte más baja del área de trabajo, el porcentaje de finos varía entre 35% y 15%.



**Figura 38. % Arenas vs Profundidad**  
Fuente. Propia

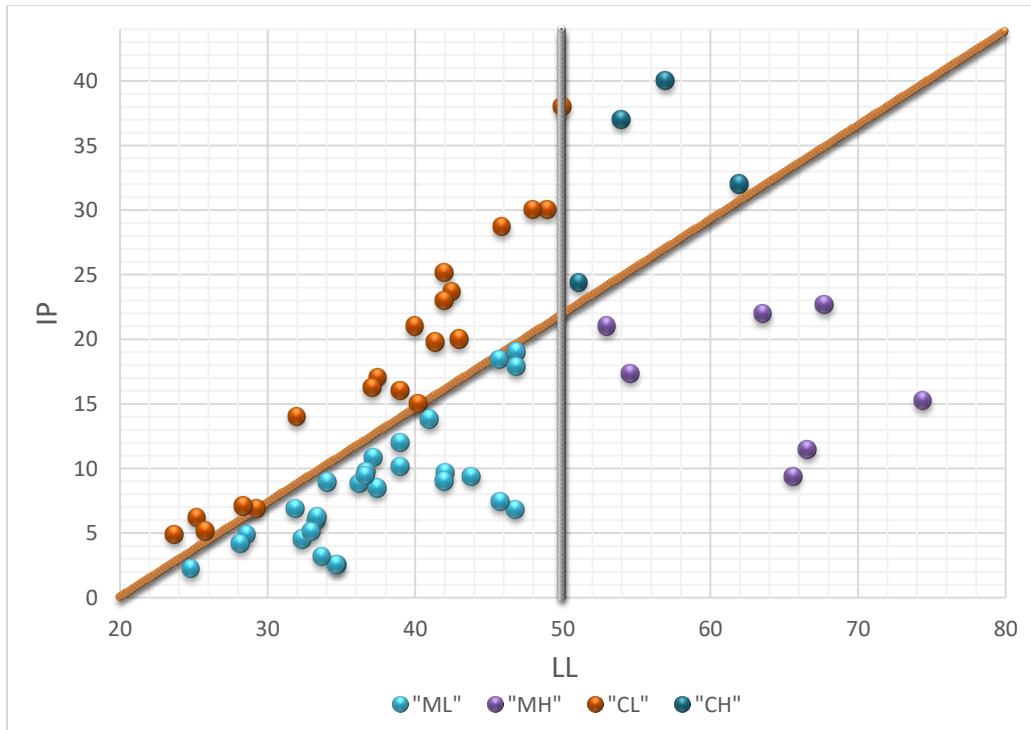




**Figura 39. % Finos vs Profundidad**  
Fuente. Propia

#### 4.2.2. Límites de Consistencia y Plasticidad

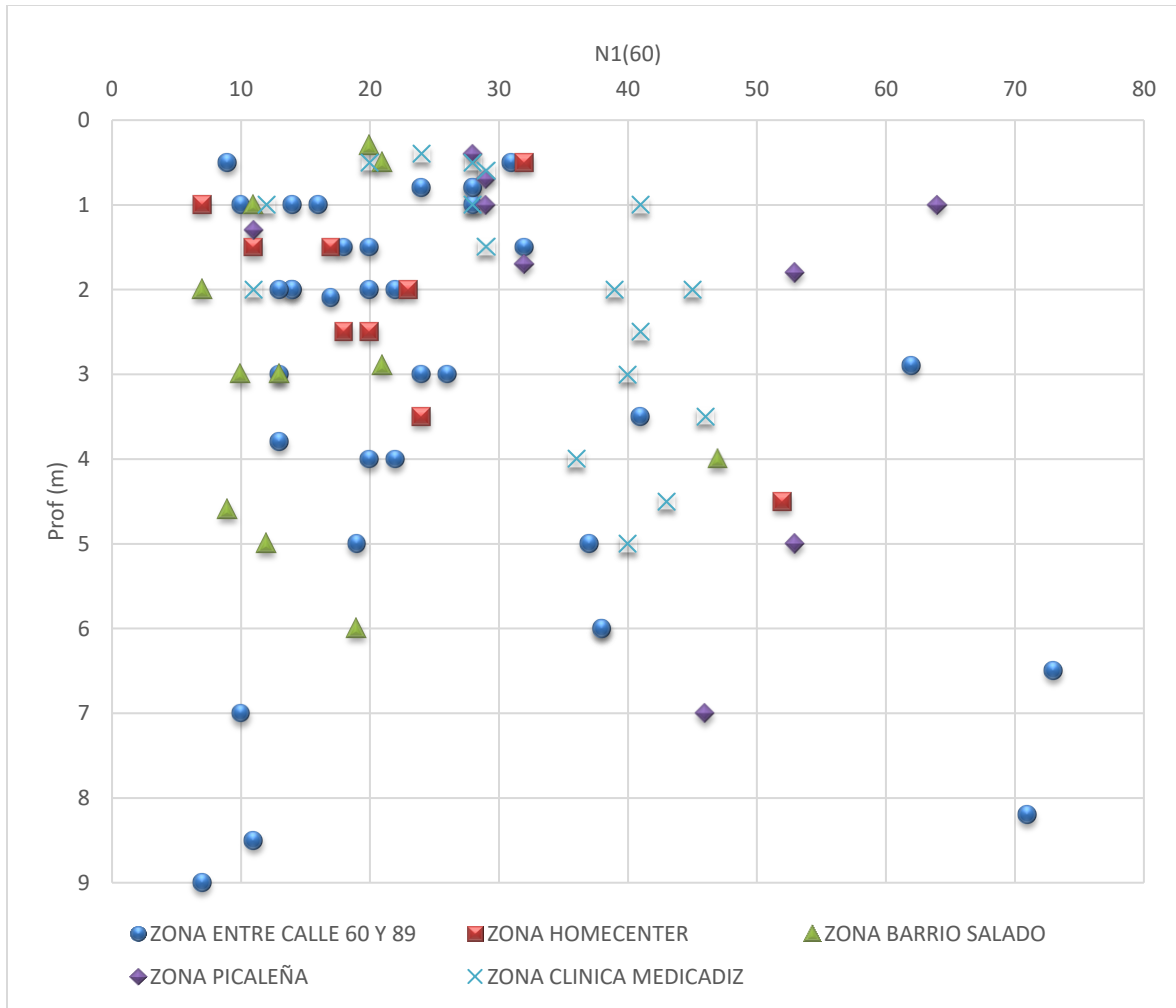
Al comparar los resultados de laboratorio de cada uno de los sondeos, de manera general predominan los limos de baja plasticidad, seguido de las arcillas de baja plasticidad y en una muy pequeña proporción los limos y arcillas de alta plasticidad, tal y como se evidencia en la Figura 40. Ahora bien, de acuerdo con lo establecido en el estudio de amenaza, respuesta dinámica y microzonificación sísmica para la ciudad de Ibagué, elaborada por la Universidad de los Andes, en el año 2006, respalda lo anteriormente dicho, estableciendo que los depósitos de materiales limo arcillosos hasta 6 metros de profundidad, muestran un valor entre 10% y 60% de límite líquido, y por debajo de dicha profundidad las capas de material fino intercaladas dentro del depósito mostraron un valor fluctuante entre 20% y 40%; además los índices de plasticidad alcanzan valores entre 10% y 25% hasta los 6m de profundidad.



**Figura 40. LL vs IP**  
Fuente. Propia

#### 4.2.3. Numero de Golpes de SPT vs Profundidad

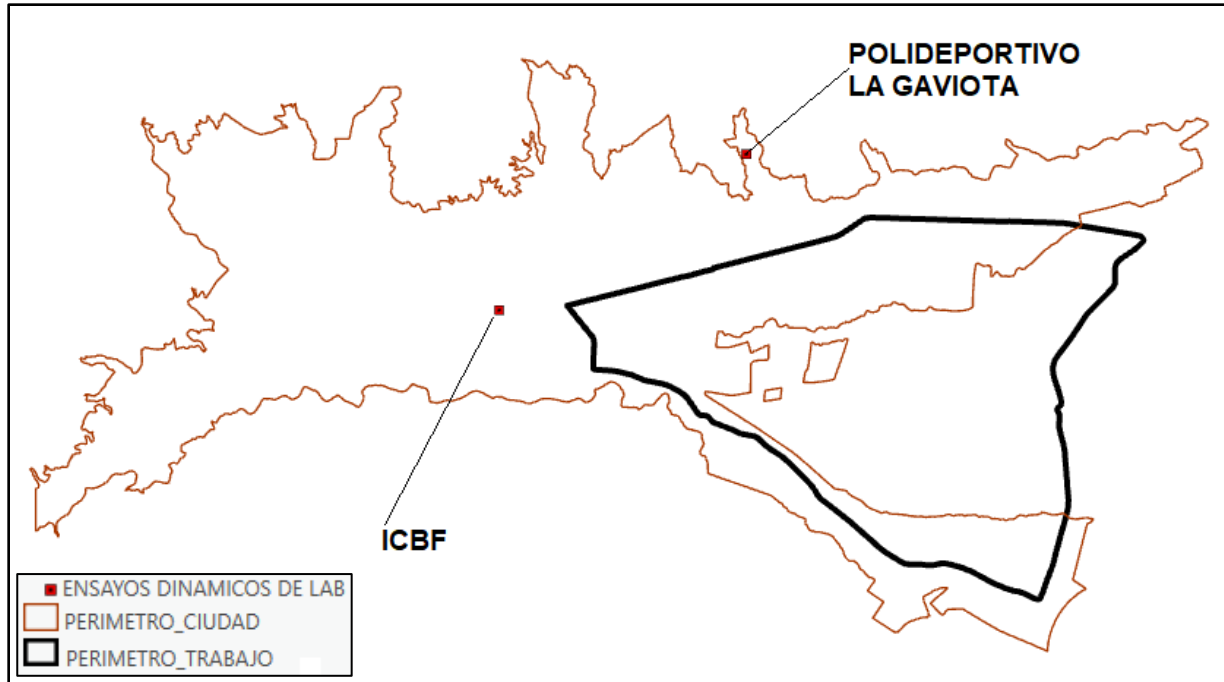
De acuerdo con las características de las exploraciones de campo, las zonas entre las calles 60 y 89, Homecenter y hacia el barrio el Salado, presentan características similares en el número de golpes del SPT corregido (energía y confinamiento), arrojando valores entre 10 a 40 golpes/pie hasta los 6 metros de profundidad y luego se pueden encontrar valores superiores hasta encontrar rechazo de SPT a los aproximadamente 9m (Ver Figura 41). Por otro lado, las zonas con cercanía a la Clínica de Medicadiz y hacia el barrio Picaleña se encuentran valores de SPT corregido de 35 golpes/pies hasta los 2m de profundidad luego de esta se evidencian valores superiores que van desde los 35 hasta 55 golpes/pie.



**Figura 41.** Numero de Golpes N1(60) vs Profundidad (m)  
*Fuente. Propia*

### 4.3. Propiedades dinámicas de los suelos

En el estudio de Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ibagué, elaborado por el Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos CEDERI de la Universidad de los Andes, en el año 2006, se llevó a cabo la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos con deformación controlada, Columnas resonantes y Velocidades de onda de corte “Bender Element” a muestras de los sondeos del ICBF y el Polideportivo la Gaviota, ubicación la cual se muestra en la Figura 42.



**Figura 42.** Localización muestras ensayos dinámicos de laboratorio.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

#### 4.3.1. Ensayo de triaxial cíclico

Una de las técnicas de laboratorio con mayor avance investigativo para determinar las características de los suelos que están sometidos a cargas cíclicas y conocer las propiedades de deformabilidad, es sin duda el ensayo de triaxial cíclico. Por lo anterior, la información de los ensayos realizados sobre muestras de suelos de la ciudad de Ibagué, permiten conocer el comportamiento del suelo frente a sollicitaciones sísmicas. Ahora bien, teniendo en cuenta que la amplificación local durante un evento sísmico depende del comportamiento de la curva de degradación del módulo ( $G$ ), los ensayos Triaxiales cíclicos se llevaron a cabo con deformación controlada.

Con base en los resultados, se evidencia que sobre cada muestra ensayada se aplicó un esfuerzo de confinamiento isotrópico ( $\alpha_3$ ) correspondiente a la profundidad de esta. Luego realizaron 13 ciclos de deformaciones angulares desde  $10^{-3}$  hasta 0.015 manteniendo el drenaje cerrado. Dicho ensayo fue realizado por medio del uso de un equipo de 4 sensores eléctricos que registran en tiempo real las deformaciones, los esfuerzos y las presiones de intersticiales en el transcurso del ensayo (CEDERI, 2006). En la Tabla 13, 14 y 15, se evidencian las características de los ensayos triaxiales cíclicos llevados a cabo; y en las figuras 43, 44 y 44 se reflejan la curva de degradaciones del módulo de corte y variación del amortiguamiento en función de la deformación unitaria para cada ensayo, respectivamente.

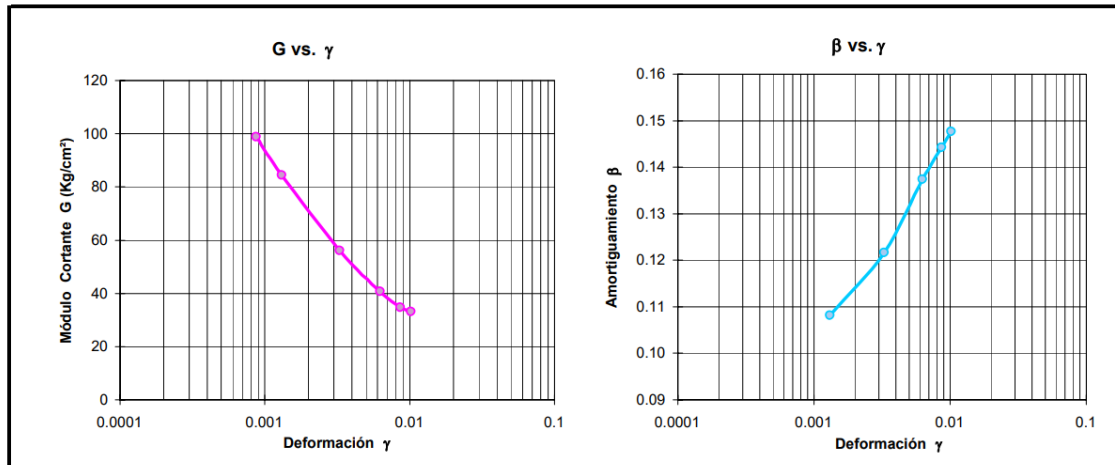


Figura 43. Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el ICBF)

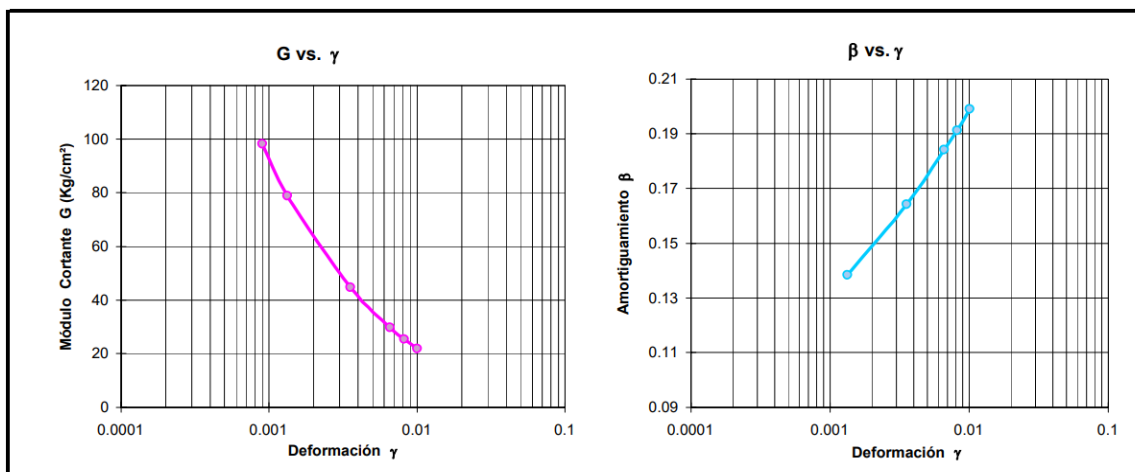
Fuente. Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO3, página 3-41, 2006

Tabla 13.

Ensayo triaxial cíclico ICBF M4

<b>PROFUNDIDAD</b>			3.45 m - 4.05m		
<b>FECHA DEL ENSAYO</b>			09/08/2006		
<b>CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS</b>					
<b>ALTURA</b>	<b>cm</b>	9.9	<b>ESFUERZO DE CONFINAMIENTO</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	0.7
<b>DIAMETRO</b>	<b>cm</b>	4.9	<b>PESO UNITARIO SATURADO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	17.79
<b>PESO INICIAL</b>	<b>g</b>	338.46	<b>PESO UNITARIO HUMEDO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	17.79
<b>PESO FINAL</b>	<b>g</b>	340.53	<b>PESO UNITARIO SECO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	16.61
<b>Gs</b>		1.92	<b>PESO SECO</b>	<b>g</b>	316.18
<b>e</b>		0.14	<b>HUMEDAD INICIAL</b>	<b>%</b>	7.05
<b>n</b>	<b>%</b>	11.93	<b>HUMEDAD FINAL</b>	<b>%</b>	7.7
<b>S</b>	<b>%</b>	100	<b>CLASIFICACION DE LA MUESTRA</b>		ML
<b>IP</b>	<b>%</b>	10.3	<b>LL</b>	<b>%</b>	37.1
<b>CICLO</b>			<b>β</b>	<b>G</b>	
<b>No.</b>	<b>γ</b>		<b>%</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
<b>13</b>	0.0102		14.8	33.1	
<b>12</b>	0.0086		14.4	34.7	
<b>11</b>	0.0063		13.7	40.7	
<b>10</b>	0.0033		12.2	56.1	
<b>9</b>	0.0013		10.8	84.5	
<b>8</b>	0.0009		10.6	98.8	

Fuente. Propia, con ayudad de los resultados de ensayos triaxiales cíclicos de la Microzonificación sísmicas de Ibagué, 2006.



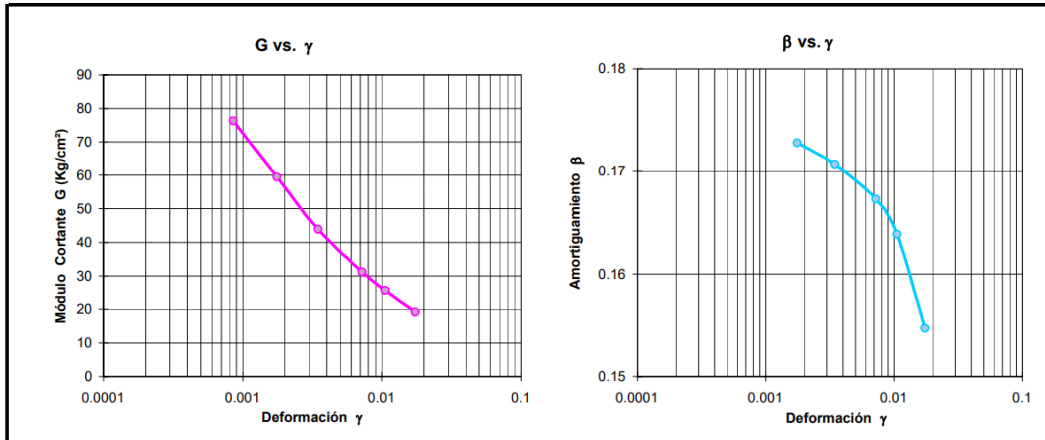
**Figura 44.** Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el Polideportivo la Gaviota Muestra 2  
**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO3, página 3-41, 2006

**Tabla 14.**

*Ensayo triaxial cíclico Polideportivo La Gaviota M2*

<b>PROFUNDIDAD</b>		1.1 m - 1.6 m			
<b>FECHA DEL ENSAYO</b>		11/08/2006			
<b>CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS</b>					
<b>ALTURA</b>	<b>cm</b>	10.22	<b>ESFUERZO DE CONFINAMIENTO</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	0.3
<b>DIAMETRO</b>	<b>cm</b>	4.94	<b>PESO UNITARIO SATURADO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	19.02
<b>PESO INICIAL</b>	<b>g</b>	379.73	<b>PESO UNITARIO HUMEDO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	19.02
<b>PESO FINAL</b>	<b>g</b>	380.76	<b>PESO UNITARIO SECO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	15.61
<b>Gs</b>		2.44	<b>PESO SECO</b>	<b>g</b>	311.72
<b>e</b>		0.53	<b>HUMEDAD INICIAL</b>	<b>%</b>	21.82
<b>n</b>	<b>%</b>	34.72	<b>HUMEDAD FINAL</b>	<b>%</b>	22.15
<b>S</b>	<b>%</b>	100	<b>CLASIFICACION DE LA MUESTRA</b>		CL
<b>IP</b>	<b>%</b>	12.8	<b>LL</b>	<b>%</b>	31
<b>CICLO</b>			<b>β</b>	<b>G</b>	
<b>No.</b>	<b>γ</b>		<b>%</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
<b>13</b>	0.0101		19.9	21.9	
<b>12</b>	0.0082		19.1	25.4	
<b>11</b>	0.0066		18.4	29.7	
<b>10</b>	0.0036		16.4	44.8	
<b>9</b>	0.0013		13.8	79	
<b>8</b>	0.0009		13.6	98.3	

**Fuente.** Propia, con ayuda de los resultados de ensayos triaxiales cíclicos de la Microzonificación sísmicas de Ibagué, 2006.



**Figura 45.** Resultados Ensayo de triaxial cíclico en el Polideportivo la Gaviota, Muestra 6  
**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO3, página 3-41, 2006

**Tabla 15.**

*Ensayo triaxial cíclico Polideportivo La Gaviota M6.*

<b>PROFUNDIDAD</b>		7.2 - 7.65			
<b>FECHA DEL ENSAYO</b>		16/08/2006			
<b>CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS</b>					
<b>ALTURA</b>	<b>cm</b>	10.17	<b>ESFUERZO DE CONFINAMIENTO</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	0.8
<b>DIAMETRO</b>	<b>cm</b>	4.99	<b>PESO UNITARIO SATURADO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	18.78
<b>PESO INICIAL</b>	<b>g</b>	380.76	<b>PESO UNITARIO HUMEDO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	18.78
<b>PESO FINAL</b>	<b>g</b>	390.91	<b>PESO UNITARIO SECO</b>	<b>kN/m<sup>3</sup></b>	12.95
<b>Gs</b>		3.25	<b>PESO SECO</b>	<b>g</b>	262.57
<b>e</b>		1.46	<b>HUMEDAD INICIAL</b>	<b>%</b>	45.01
<b>n</b>	<b>%</b>	59.42	<b>HUMEDAD FINAL</b>	<b>%</b>	48.88
<b>S</b>	<b>%</b>	100	<b>CLASIFICACION DE LA MUESTRA</b>		CL
<b>IP</b>	<b>%</b>	12.8	<b>LL</b>	<b>%</b>	31
<b>CICLO</b>			<b>β</b>	<b>G</b>	
<b>No.</b>	<b>γ</b>		<b>%</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
<b>13</b>	0.0174		15.5	19.5	
<b>12</b>	0.0106		16.4	25.6	
<b>11</b>	0.0072		16.7	31.1	
<b>10</b>	0.0035		17.1	43.8	
<b>9</b>	0.0018		17.3	59.4	
<b>8</b>	0.0009		17.6	76.3	

**Fuente.** Propia, con ayudad de los resultados de ensayos triaxiales cíclicos de la Microzonificación sísmicas de Ibagué, 2006.

### 4.3.2. Ensayo de Columna Resonante

Mediante la aplicación de una vibración forzada a una muestra de suelo y ajuste de la frecuencia de la excitación se logra hacer entrar a la muestra ensayada en resonancia, dicha vibración puede ser longitudinal, transversal o de torsión aplicadas por medio de bobinas eléctricas colocadas en un campo de imanes permanentes. El ensayo de columna resonante conserva las ventajas del triaxial cíclico, el cual es el control del drenaje, medida de la presión intersticial, posibilidad de aplicar una amplia gama de esfuerzos estáticos, entre otros; además permite medir las características de los suelos a deformaciones con amplitudes que oscilan entre  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  para ensayos de torsión y en ensayos de compresión, deformaciones menores a las mencionadas.

En el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué, se llevaron a cabo los ensayos de columna resonante sobre dos muestras (ICBF y Polideportivo Gaviota), realizando medición de los parámetros de amplitud de la vibración en función de la frecuencia para diferentes energías de excitación de las bobinas (diferentes niveles de deformación) (Figura 46.a) y la curva de decaimiento de la vibración una vez se interrumpe la excitación (Figura 46.b). Con lo anterior, se determinó la frecuencia de resonancia y por ende el módulo de corte G (Figura 47.a) y el amortiguamiento (Figura 47.b).

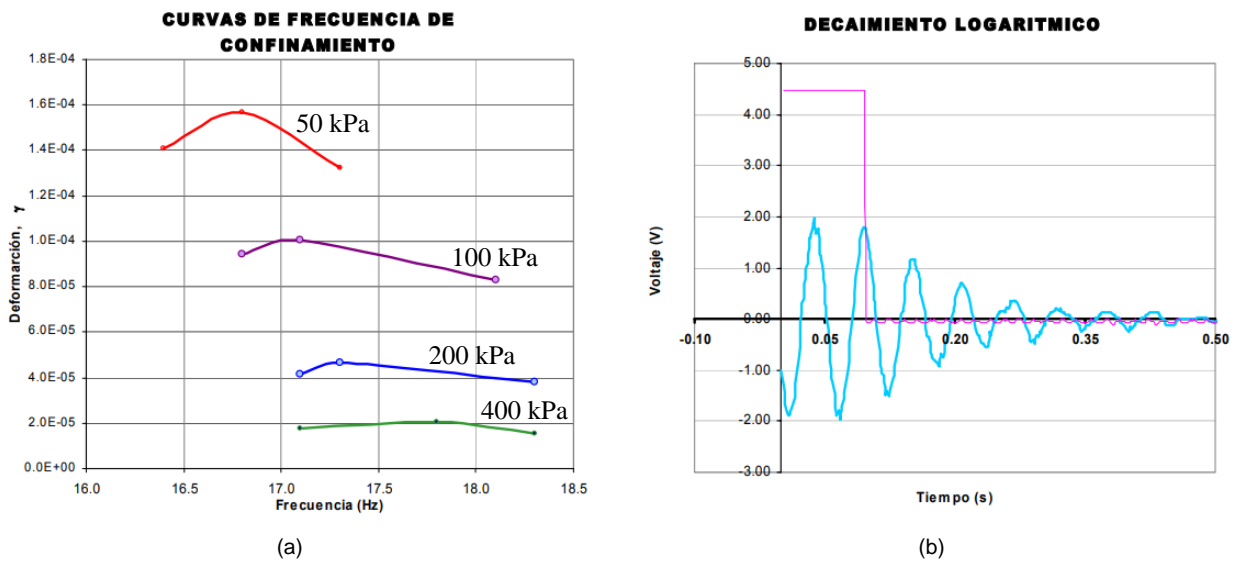
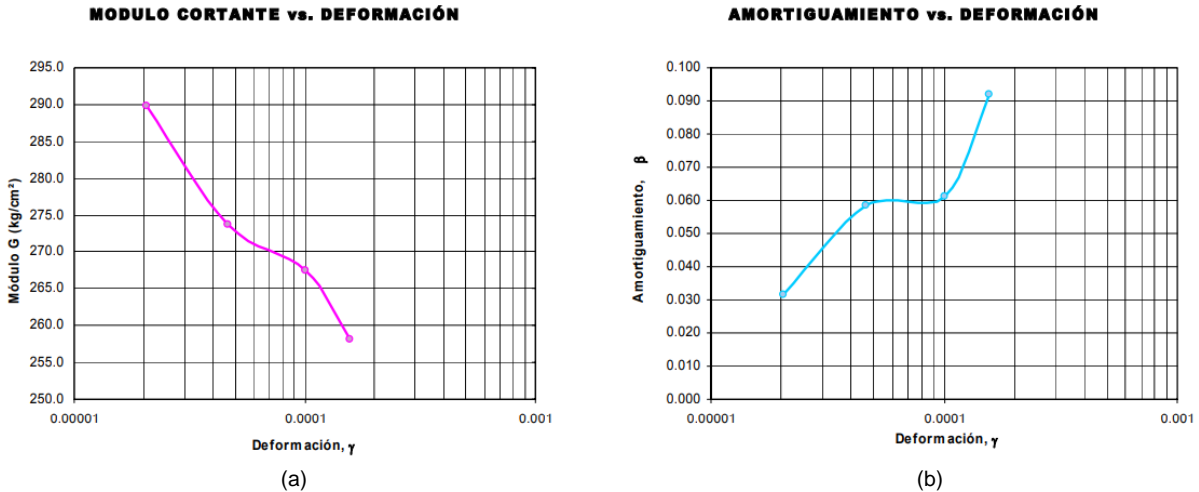


Figura 46. Resultados Ensayo de columna Resonante, curvas de frecuencia de confinamiento (a) y curva de decaimiento de la vibración (b)

Fuente. Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO3, página 3-41, 2006





**Figura 47.** Resultados Ensayo de columna Resonante, curvas de degradación del módulo de corte (a) curva comportamiento del amortiguamiento (b).

**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO3, página 3-41, 2006

### 4.3.3. Ensayo de velocidad de onda “Bender Elements”

El ensayo “Bender Elements”, determina la velocidad de la onda de forma directa, al medir el tiempo transcurrido entre el disparo de una excitación desde un extremo de la muestra ensayada de longitud conocida y la recepción de la onda en un receptor piezoeléctrico ubicado en el otro extremo de la muestra. Además, identifica la velocidad de onda para bajas deformaciones lo que permite definir el módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ), por medio de la Ecuación 5.

$$G_{max} = \rho * V_s^2 \quad (5)$$

Donde,

$\rho =$  Densidad del suelo (kg/ m<sup>3</sup>)

$V_s =$  Velocidad de onda de corte medida en el ensayo de Bender Elements (m/s)

Dado lo anterior, los resultados de laboratorio del ensayo de velocidad de onda de corte realizados identificaron el módulo de Corte máximo ( $G_{max}$ ), el cual es fundamental para la construcción del modelo de degradación del módulo de corte (G). En la Tabla 16, y grafica 12, se evidencian los resultados de los ensayos de velocidad de onda de corte para dos muestras del sondeo Polideportivo La Gaviota y una muestra para el sondeo del ICBF.

**Tabla 16.***Resultados de ensayos de velocidad de onda de corte*

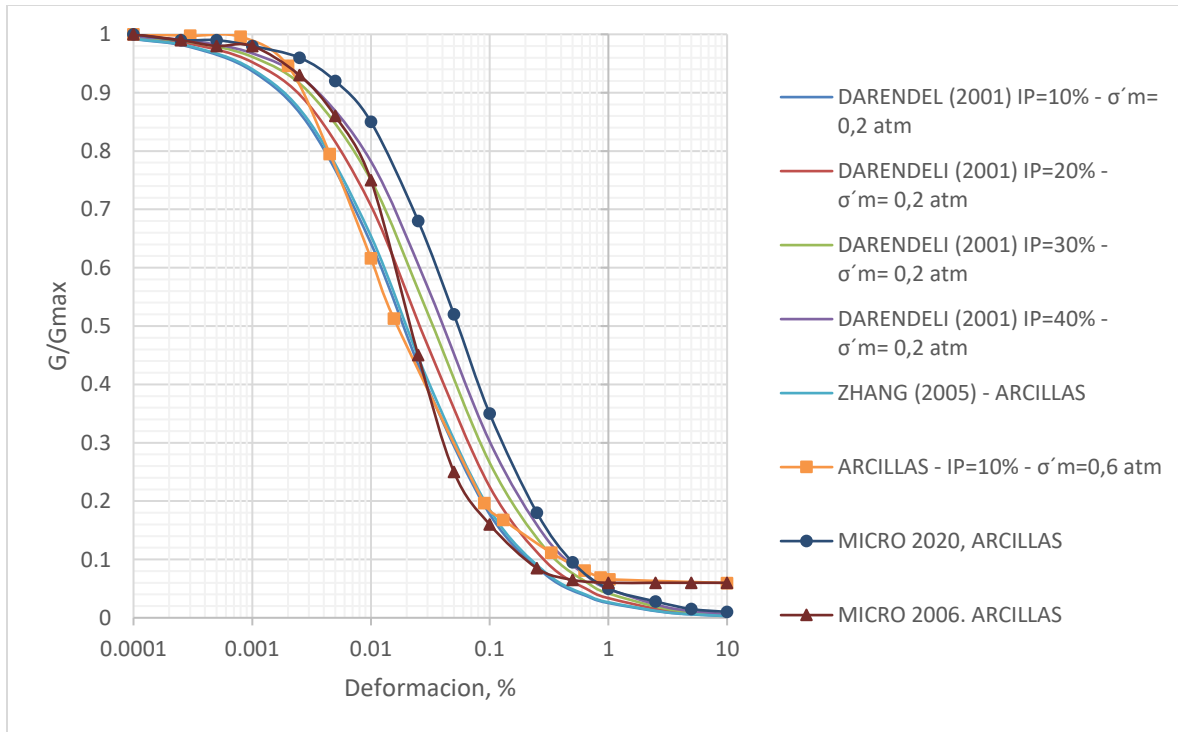
No. SONDEO	#	RECREACAFE	POLIDEPORTIVO LA GAVIOTA	ICBF	POLIDEPORTIVO LA GAVIOTA
MUESTRA	#	5 – Roca	2	4	6
PROFUNDIDAD	m	5-6	1.1-1.6	3.45-4.05	7.2-7.65
ALTURA	cm	9.95	10.22	9.9	10.09
PESO	g	592.06	379.73	338.46	390.91
PESO UNITARIO	$kN/m^3$	25.60	19.38	18.12	19.81
TIEMPO	s	0.000125	0.00052	0.0006	0.00047
VELOCIDAD	m/s	796.00	196.53	165.00	214.68
Gmax	kPa	1653537.53	76303.15	50287.15	93067.62

Fuente. Propia, con ayuda de los resultados de ensayos velocidad de onda de corte “Bender Elements” de la Microzonificación sísmicas de Ibagué, 2006.

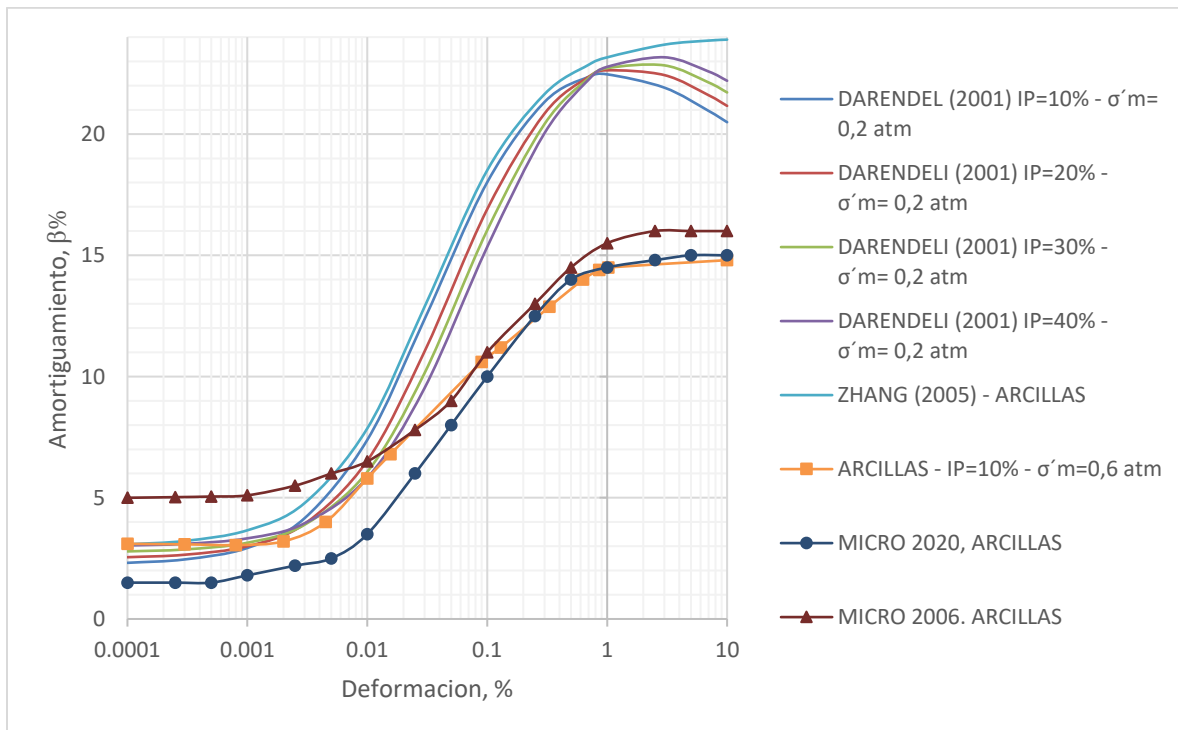
#### 4.3.4. Modelo de comportamiento dinámico de los suelos

El comportamiento dinámico de los suelos granulares difiere del comportamiento dinámico de los suelos finos, y por esta razón, se debe establecer la revisión bibliografía y comparar las curvas dinámicas establecidas por diferentes autores para los distintos tipos de suelos y así obtener resultados viables que representen un comportamiento dinámico real y creíble de los suelos.

El comportamiento dinámico de los suelos se obtuvo mediante la implementación de los resultados de los ensayos de laboratorio descritos en el numeral anterior; para ello se normalizó el valor del módulo de corte (G) con el módulo de corte máximo (Gmax), obtenido en el ensayo de Bender Element y se relacionó con los resultados de los ensayos de Downhole, posteriormente se procedió a realizar la curva de degradación del módulo en función de la deformación angular (0.0001-10%) y la curva de variación del amortiguamiento. Una vez realizado esto, se comparó con las curvas realizadas en la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué en el año 2006, la actualización de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué del año 2020 y las familias de curvas propuestas por Zang (2005), Seed & Idriss (1970), Menq (2003) y Andrus (2003) para limos y arenas y Darendeli (2001) y Zhang (2005) para arcillas con índice de plasticidad (IP) igual a 10%, tal y como se evidencia en las figuras 48 - 50.

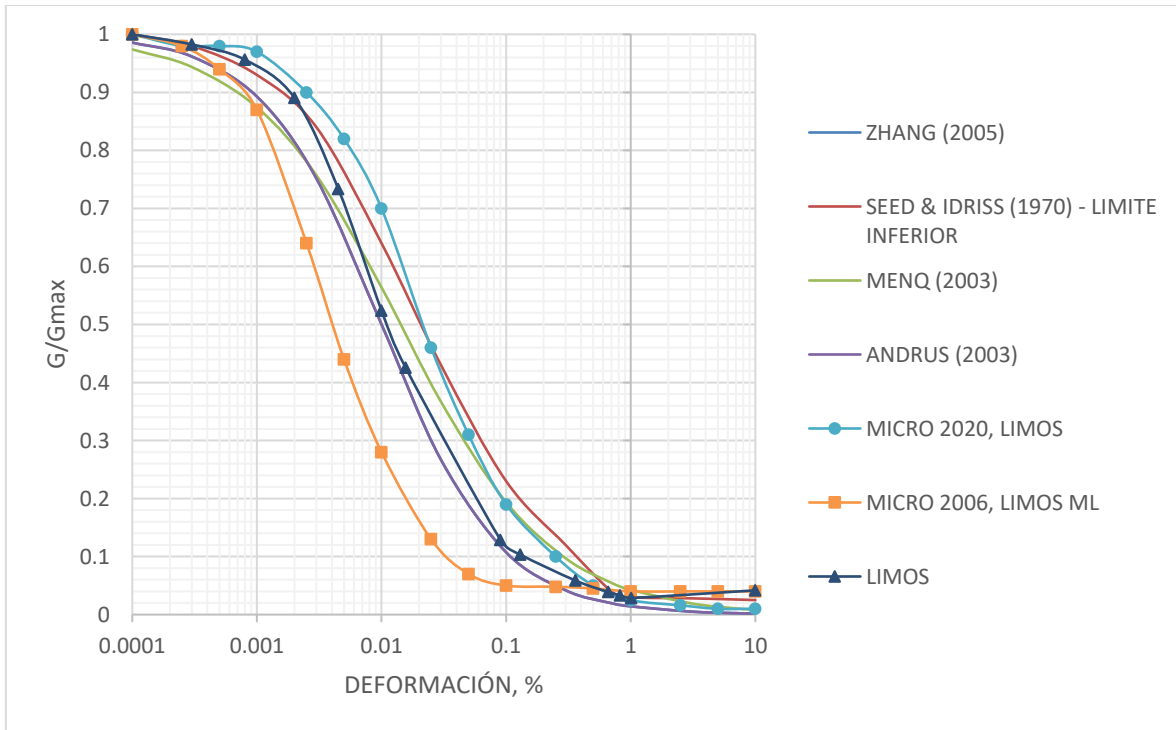


(a)

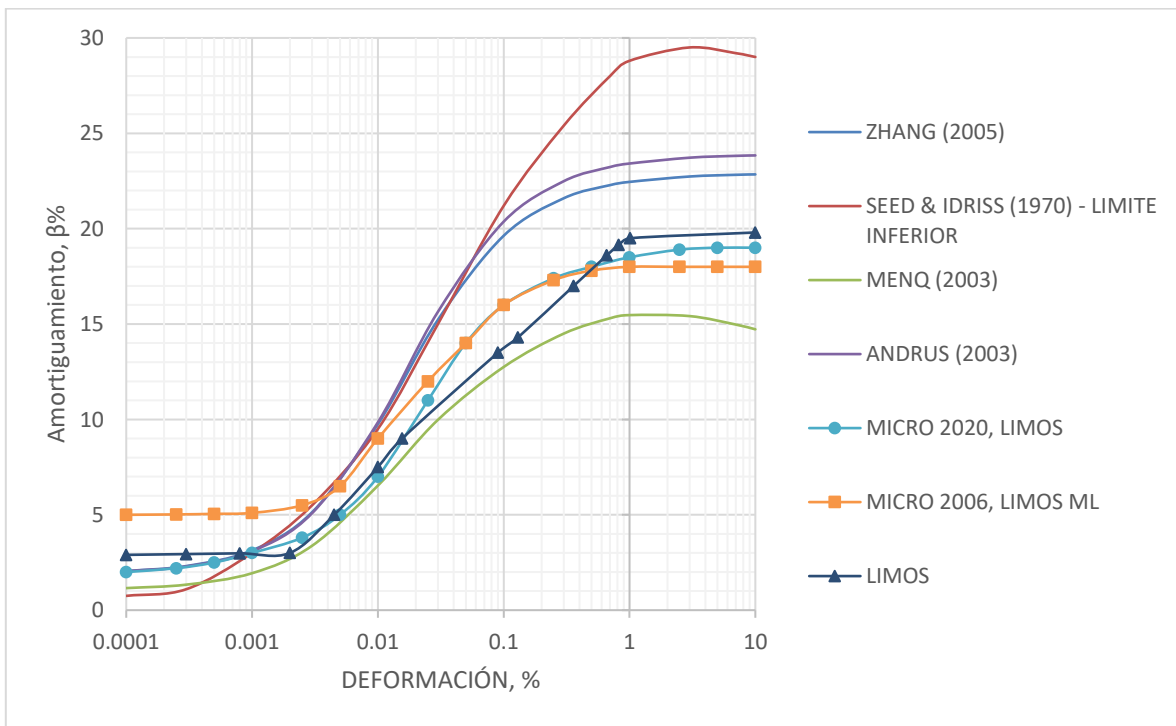


(b)

**Figura 48.** Comportamiento dinámico de Arcillas (a) Degradación del módulo de corte  $G/G_{max}$  (b) variación del amortiguamiento.  
**Fuente.** Propia, con base en la información dinámica obtenida.

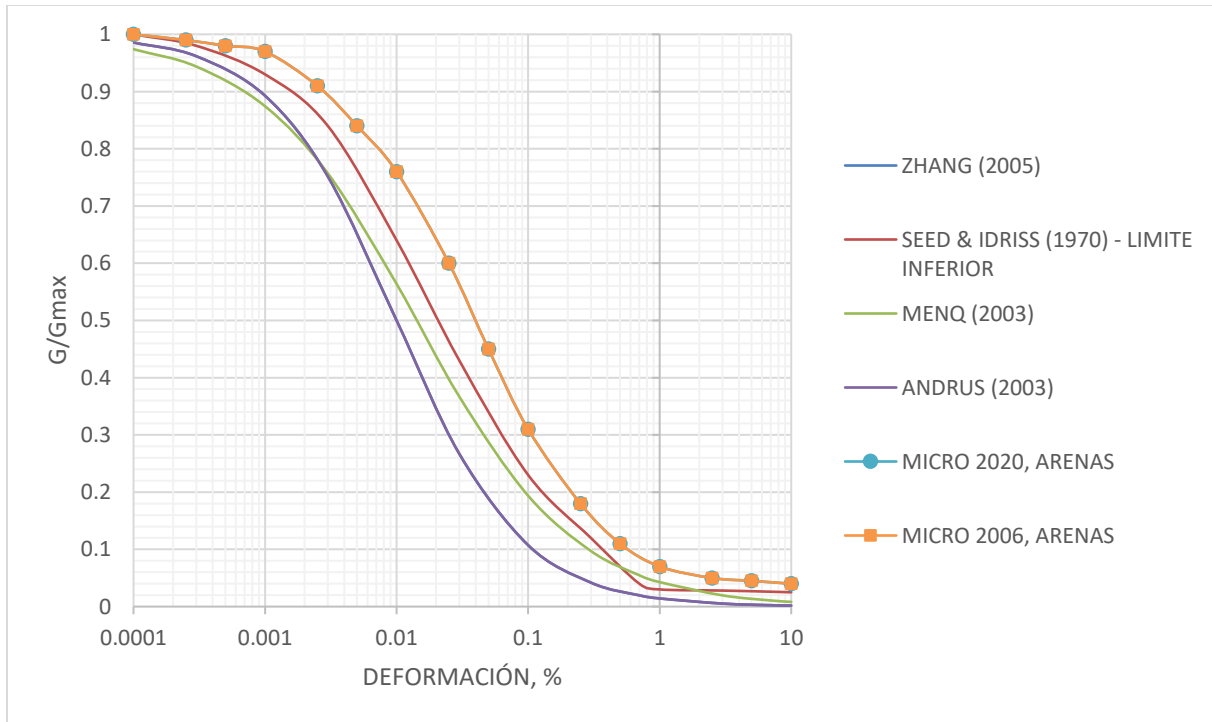


(a)

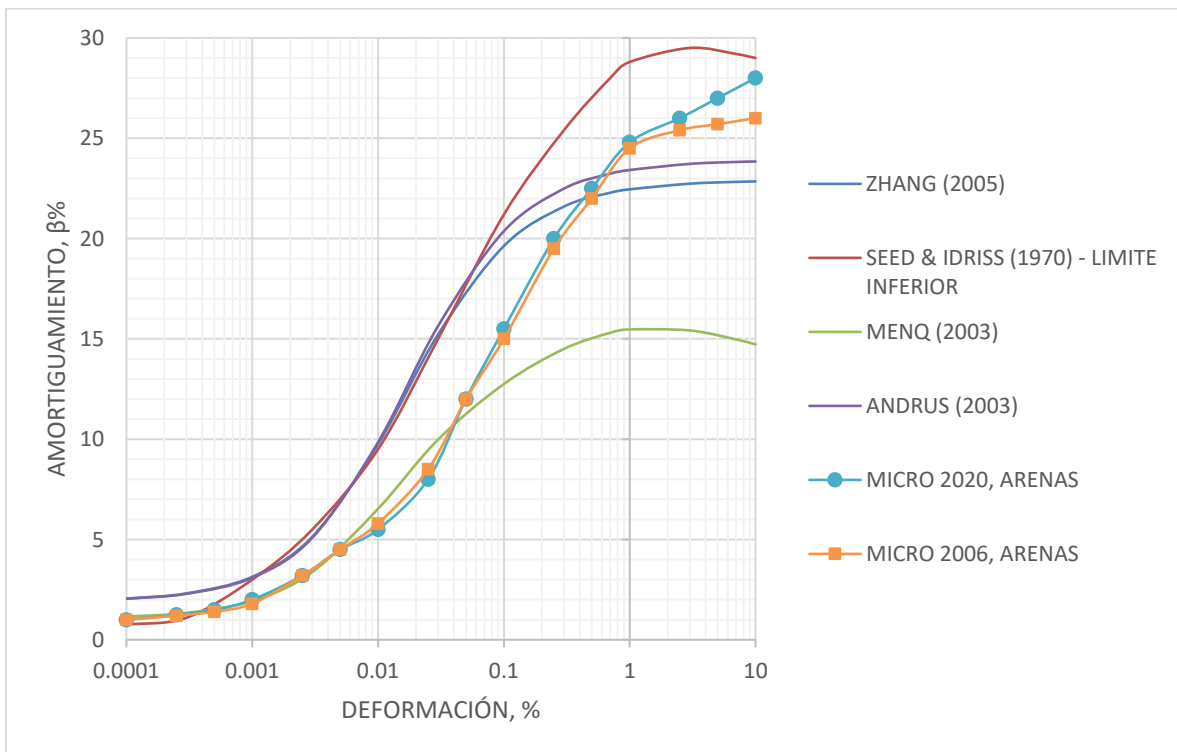


(b)

**Figura 49.** Comportamiento dinámico de Limos (a) Degradación del módulo de corte  $G/G_{max}$  (b) variación del amortiguamiento. **Fuente.** Propia, con base en la información dinámica obtenida.



(a)



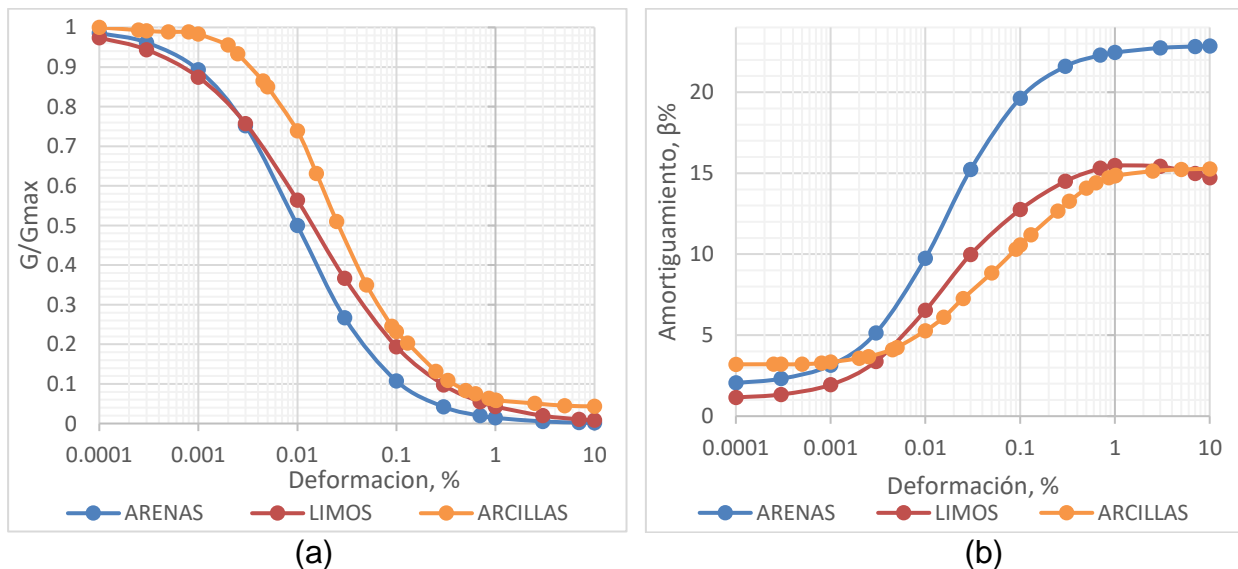
(b)

**Figura 50.** Comportamiento dinámico de Arenas (a) Degradación del módulo de corte  $G/G_{max}$  (b) variación del amortiguamiento.  
**Fuente.** Propia, con base en la información dinámica obtenida.

### 4.3.5. Curvas dinámicas de degradación del módulo de corte y variación del amortiguamiento

Una vez realizado la comparación de las curvas dinámicas obtenidas entre las curvas de los ensayos dinámicos, estudios de microzonificación anteriores y modelos propuestos por diferentes autores, se evidenció que para los suelos arcillosos las curvas dinámicas de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué en el año 2006, la actualización de la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué del año 2020 junto con las curvas constituidas a partir de los ensayos dinámicos (Triaxial, Bender Element y columna Resonante), siguen un comportamiento similar, por lo que se optó en tomar los valores medios entre las tres (3) curvas para la degradación de módulo y la variación del amortiguamiento.

Para los suelos limosos se tomaron las curvas recomendadas por Menq (2003) y para las arenas las recomendadas por Zang (2005) ya que las anteriores representan mejor el comportamiento de los suelos con relación a la comparación realizada. En la Figura 51, se presentan el modelo dinámico de degradación del módulo de corte  $G/G_{max}$  y la variación del amortiguamiento, para cada tipo de suelo.



**Figura 51.** Curvas dinámicas (a) degradación del módulo de corte (b) variación del amortiguamiento  
**Fuente.** Propia, con base en la información dinámica obtenida.

#### 4.4. Clasificación Sísmica de los Suelos

Para la clasificación sísmica de los suelos se propone identificar dos parámetros dinámicos del terreno, los cuales son:

1. Velocidad de onda de corte VS30.
2. Periodo predominante del sitio

##### 4.4.1. Velocidad de Onda de Corte $V_{s30}$

Para la determinación de las velocidades de onda de corte de los depósitos que subyacen la zona de estudio, se implementa la teoría propuesta por Borchardt y Glassmoyer (1992-1994) en la cual considera que, aunque es una equivalencia existe la limitante de haber sido desarrollada a partir de la clasificación de solamente los 30m superiores del depósito de suelo, así las cosas, la velocidad de onda del depósito está dada por la Ecuación 6

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=2}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (6)$$

Donde,

$h_i$  = Estrato de suelo  $i$ , localizado dentro de los 30 metros del perfil

$V_{si}$  = Velocidad de la onda de corte del suelo del estrato  $i$

Con cada uno de los ensayos geofísicos se calculó las velocidades de onda, entre ellos 13 ensayos de DownHole, 9 ensayos MASW, 6 ensayos ReMi, evidenciándose que la velocidad de onda de corte del depósito oscila entre 210 a 768m/s, además con base en lo establecido en el numeral A.2.4.4 del título A de la NSR-10, se determinó la clasificación del tipo de perfil del suelo arrojando que aproximadamente el 15% de la superficie de estudio se encuentra sobre perfil de suelo tipo D, el cual se caracteriza por velocidades de onda entre 180 y 360 m/s, y el 85% restante de la superficie, subyace suelo tipo C el cual se caracteriza por tener velocidad de onda que van desde 360 a 760m/s, lo anterior se logra evidenciar en la Tabla 17.

**Tabla 17.***Velocidad de Onda de corte equivalente Vs30*

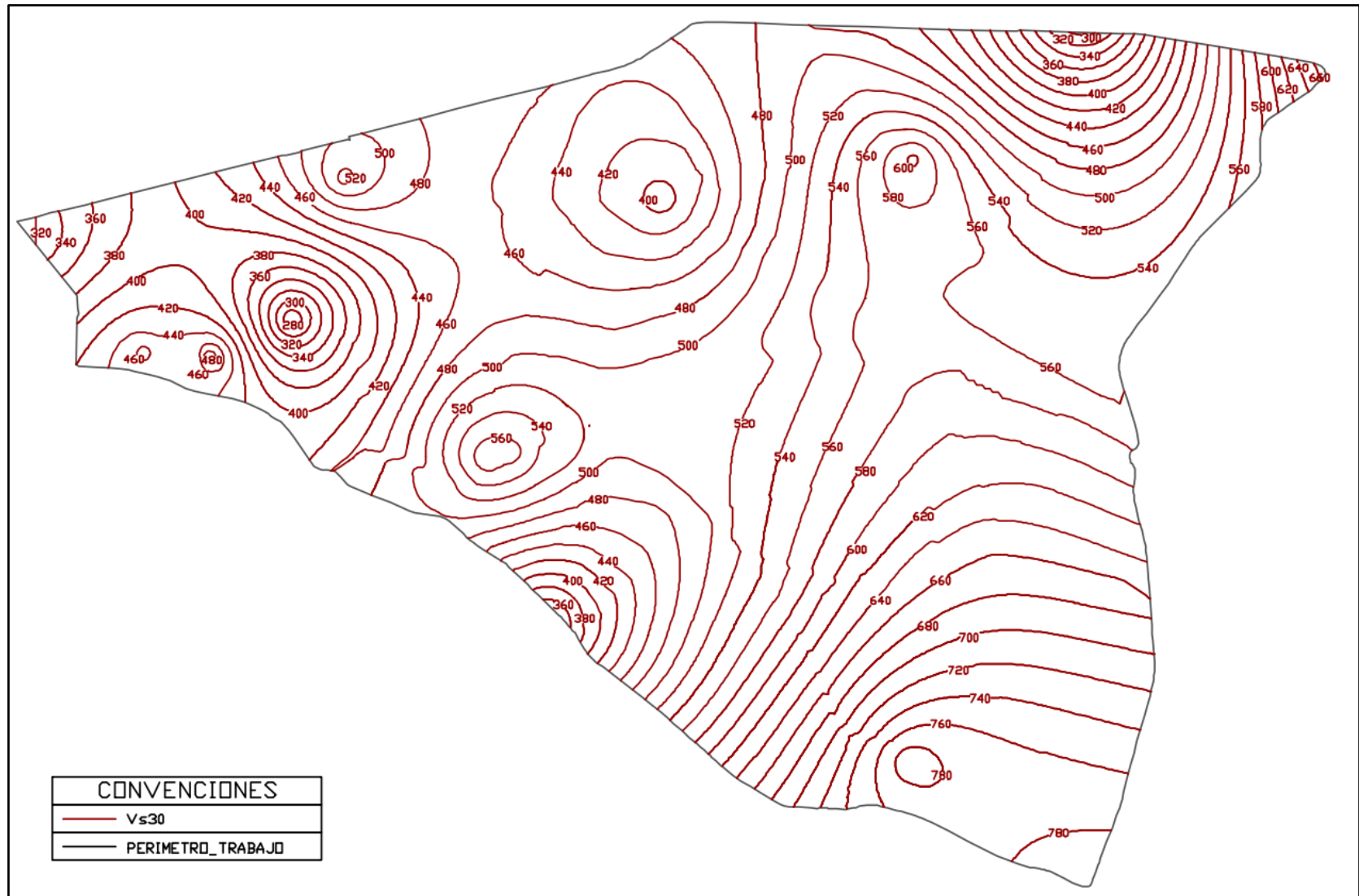
<b>ENSAYO No.</b>	<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>PERFIL DEL SUELO</b>	<b>ENSAYO No.</b>	<b>Vs30 (m/s)</b>	<b>PERFIL DEL SUELO</b>
DH_1	315.24	D	MASW_2	570.76	C
DH_2	248.22	D	MASW_3	559.83	C
DH_3	304.32	D	MASW_4	589.730	C
DH_4	210.31	D	MASW_5	564.116422	C
DH_5	516.37	C	MASW_6	382.60	C
DH_6	683.98	C	MASW_7	475.73	C
DH_7	559.83	C	MASW_8	416.74	C
DH_8	531.66	C	MASW_9	610.1	C
DH_9	768.00	C	ReMi_1	444.7347079	C
DH_10	565.56	C	ReMi_2	472.7634379	C
DH_11	815.37	C	ReMi_3	432.8743042	C
DH_12	656.00	C	ReMi_4	406.4041022	C
DH_13	756.28	C	ReMi_5	513.1020091	C
MASW_1	564.84	C	ReMi_6	461.1645354	C

Fuente. Microzonificación sísmica de Ibagué, 2006.

Con la finalidad de identificar la distribución aproximada de las velocidades de onda del suelo a través de toda el área del polígono de trabajo, se estableció un mapa de velocidad de onda de corte por medio de interpolación Kriging Bayesiano Empírico (EBK), el cual es un método que automatiza los aspectos más complejos de la creación de un modelo Kriging valido, además este método tiene en cuenta el error del semivariograma subyacente.

Para la obtención del mapa de velocidad de onda, se identificaron los valores errados de  $V_{s30}$  entre los puntos cercanos dados en la Tabla 14, con la finalidad de conseguir una interpolación consistente y con el menor número de datos erróneos posibles. La Figura 52, muestra el mapa de Velocidad de onda haciendo uso de los 27 datos obtenidos de los ensayos geofísicos.





**Figura 52.** Mapa de velocidad de onda de corte del suelo (m/s), Esc. 1:50.000  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

#### 4.4.2. Periodo de vibración predominante del sitio

Con la finalidad de conocer la caracterización dinámica del sitio, es fundamental la determinación del periodo predominante de vibración de los suelos que subyacen el área de estudio, el cual depende no solo de las estratigráfica del suelo sino también de la profundidad a la cual se encuentre el basamento rocoso y la velocidad de onda de corte, la cual ya fue obtenida en el numeral 3.4.1, es por esto que en primera instancia, se hizo uso de los ensayos de vibración ambiental relacionados en el capítulo 2, para ellos se tomó los espectros HVSR y se determinó los valores de  $T_s$  para cada uno, además con ayuda de los perfiles de velocidad de onda de corte obtenidos en los ensayos Geofísicos (DownHole, ReMi y MASW), se determinó el periodo de vibración predominante por medio del método de Towhata, 2016, tal y como se muestra en la Ecuación 7

$$T_G = T_S = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}} \quad (7)$$

Donde,

$n$  = Numero de estratos de suelo en el perfil estratigrafico

$h_i$  = Estrato de suelo  $i$ , localizado dentro de lo 30metros del perfil

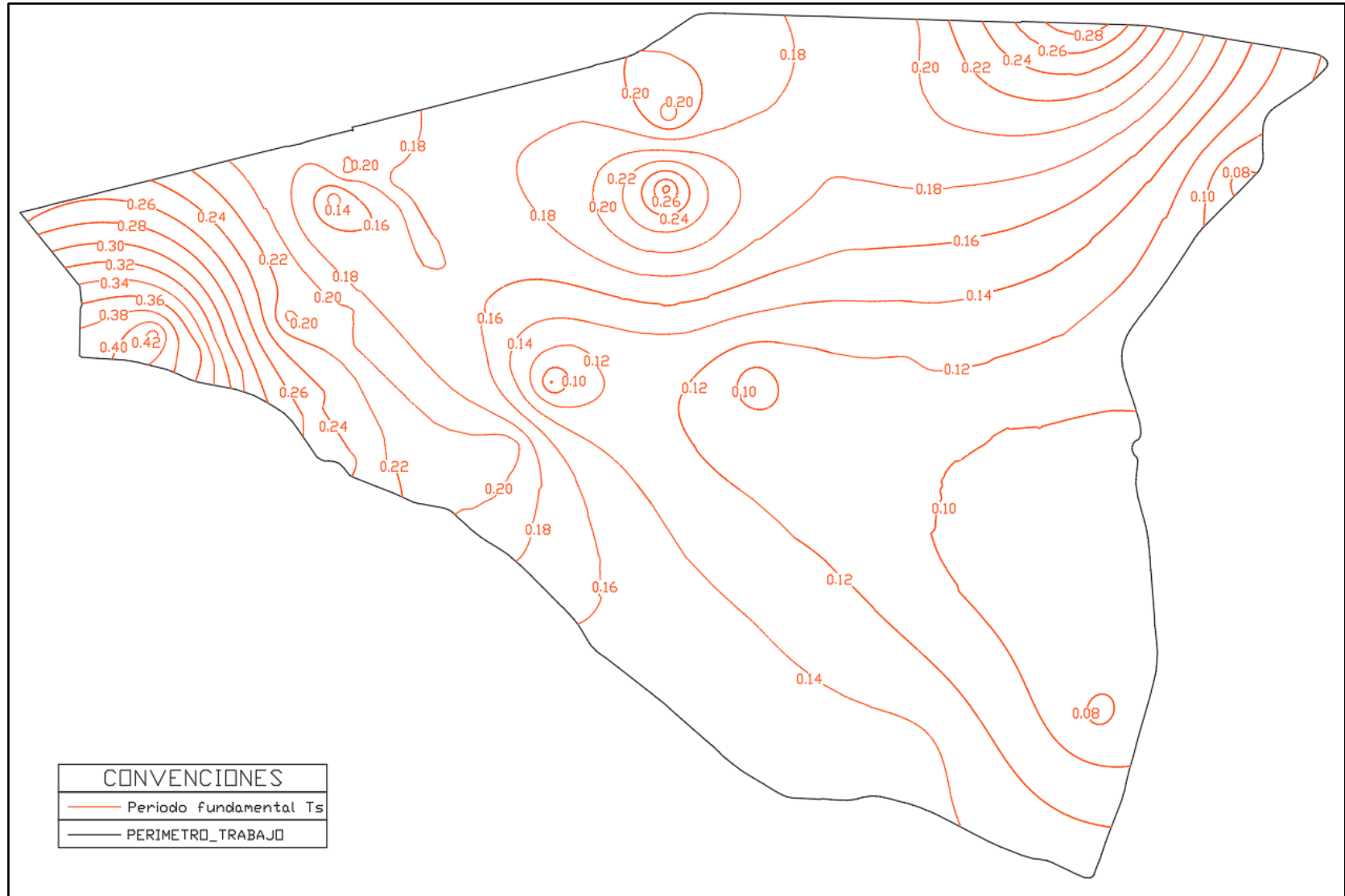
$V_{si}$  = Velocidad de la onda de corte del suelo del estrato  $i$

De los 49 valores obtenidos para el periodo de vibración predominante del sitio, tal y como se evidencia en la Tabla 18 e implementando una interpolación espacial a través de la metodología de Kriging bayesiano empírico (EBK), se obtuvo el mapa de Isoperiodos del suelo ( $T_s$ ). El suelo que subyace la zona de estudio presenta periodos de vibración que oscilan desde 0.058s a 0.54s. En la Figura 53, se evidencia el mapa de los periodos fundamentales de vibración ( $T_s$ ), para el polígono de trabajo.

**Tabla 18.***Periodo de vibración predominante del sitio*

<b>ENSAYO No.</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>ENSAYO No.</b>	<b>Ts (s)</b>
<b>DH_1</b>	0.27915	<b>MASW_1</b>	0.21245
<b>DH_2</b>	0.24172	<b>MASW_2</b>	0.21024
<b>DH_3</b>	0.21030	<b>MASW_3</b>	0.21435
<b>DH_4</b>	0.38039	<b>MASW_4</b>	0.20348
<b>DH_5</b>	0.12394	<b>MASW_5</b>	0.21272
<b>DH_6</b>	0.11111	<b>MASW_6</b>	0.31364
<b>DH_7</b>	0.13576	<b>MASW_7</b>	0.25225
<b>DH_8</b>	0.21818	<b>MASW_8</b>	0.28795
<b>DH_9</b>	0.10677	<b>ReMi_1</b>	0.44701
<b>DH_10</b>	0.11316	<b>ReMi_2</b>	0.42304
<b>DH_11</b>	0.05887	<b>ReMi_3</b>	0.36962
<b>DH_12</b>	0.07927	<b>ReMi_4</b>	0.39370
<b>DH_13</b>	0.07405	<b>ReMi_5</b>	0.31183
		<b>ReMi_6</b>	0.34695
<b>MICRO 1</b>	0.1200	<b>MICRO 12</b>	0.0708
<b>MICRO 2</b>	0.1802	<b>MICRO 13</b>	0.0764
<b>MICRO 3</b>	0.1100	<b>MICRO 14</b>	0.0606
<b>MICRO 4</b>	0.1701	<b>MICRO 15</b>	0.1082
<b>MICRO 5</b>	0.1100	<b>MICRO 16</b>	0.4666
<b>MICRO 6</b>	0.0602	<b>MICRO 17</b>	0.1204
<b>MICRO 7</b>	0.1502	<b>MICRO 18</b>	0.5408
<b>MICRO 8</b>	0.1502	<b>MICRO 19</b>	0.0660
<b>MICRO 9</b>	0.1572	<b>MICRO 20</b>	0.0604
<b>MICRO 10</b>	0.1532	<b>MICRO 21</b>	0.0672
<b>MICRO 11</b>	0.1478	<b>MICRO 22</b>	0.4778

**Fuente.** Propia, con ayuda de los resultados de ensayos triaxiales cíclicos de la Microzonificación sísmicas de Ibagué, 2006.



**Figura 53.** Mapa de periodos fundamentales de vibración del suelo  $T_s$  (s), Esc. 1:50.000  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

## Capítulo V

### Amenaza Sísmica

La ubicación de la ciudad de Ibagué hace de esta una zona de amenaza sísmica alta, por la cercanía significativa con fuentes sísmicas de gran importancia, por esto es de vital importancia conocer a detalle la posible amenaza sísmica e identificar los ambientes tectónicos que la representan, para así lograr obtener parámetros requeridos para estudiar el comportamiento dinámico y respuesta del suelo frente a una excitación sísmica.

#### 5.1. Sísmicidad Asociada

Complementando lo establecido en el numeral 1.3, en el territorio Colombiano numerosos sismos de magnitud superior a 6.5 han sido atribuidos a los sistemas de fallas del territorio Colombiano, de acuerdo a la información sísmológica disponible de catálogo sísmico de Colombia (Ver Tabla 19), atribuyéndolos principalmente a dos ambientes tectónicos, el primero a sismos relacionados con la zona de subducción de Nazca, alcanzado profundidades que aumentan progresivamente desde la Costa Pacífica hacia la Cordillera de Los Andes y el segundo, los sismos de los sistemas de fallas que afectan la corteza continental plegada y deformada a lo largo y ancho de las cordilleras Colombianas (Uniandes, 2006).

**Tabla 19.**

*Sismos Históricos 1644 - 2013*

No.	AÑO	MAG.	PROF	INT. MAX	ÁREA EPICENTRAL
1	1644	6.5 Mw	15	9	Pamplona, Norte de Santander
2	1766	6.5 Mw	15	8	Buga, Valle del Cauca
3	1785	7.1 Mw	10	7	Suroriente de Cundinamarca, Cundinamarca
4	1826	6.5 Mw	15	8	Úmbita, Boyacá
5	1827	7.1 Mw	15	10	Altamira, Huila
6	1834	6.7 Mw	15	9	Santiago, Putumayo
7	1875	6.8 Mw	15	10	Cúcuta, Norte de Santander
8	1882	6.5 Mw	15	9	Colón, Colón-Panamá;
9	1884	6.5 Mw	120	8	Herveo, Tolima

Fuente. Servicio Geológico Colombiano, 2022.

**Tabla 19. Continuación***Sismos Históricos 1644 - 2013*

<b>No.</b>	<b>AÑO</b>	<b>MAG.</b>	<b>PROF</b>	<b>INT. MAX</b>	<b>ÁREA EPICENTRAL</b>
10	1906	8.8 Mw	20	10	Costa Pacífica, Pacífico
11	1917	6.7 Mw	15	9	Villavicencio, Meta
12	1938	7.0 Ms	150	8	Eje Cafetero, Colombia
13	1957	6.6 Mw	120	7	Málaga, Santander
14	1958	7.6 Mw	27.5	8	Esmeraldas, Esmeraldas-Ecuador
15	1961	6.5 Ms	114	7	Ocaña, Norte de Santander
16	1961	6.8 Ms	163	8	Eje Cafetero, Colombia
17	1962	6.5 Mw	64	8	Eje Cafetero, Colombia
18	1967	7.0 Mw	55	10	Colombia, Huila
19	1967	6.8 Mw	161	8	Betulia, Santander
20	1970	6.6 Mw	15	8	Bahía Solano (Ciudad Mutis), Chocó
21	1974	7.1 Mw	10	8	Costa Pacífica, Pacífico
22	1976	6.6 Mw	17.4	8	Esmeraldas, Esmeraldas-Ecuador
23	1976	7.3 Mw	17.5	8	Darién, Darién-Panamá;
24	1977	6.5 Mw	23.3	7	Apartadó, Antioquia
25	1979	7.2 Mw	110	8	Eje Cafetero, Colombia
26	1979	8.1 Mw	23.6	10	Costa Pacífica, Pacífico
27	1983	6.7 Mw	25	5	Costa Pacífica, Pacífico
28	1991	7.2 Mw	18.5	8	Costa Pacífica, Pacífico
29	1992	7.1 Mw	10	10	Murindó, Antioquia
30	1994	6.8 Mw	10	8	Páez (Belalcázar), Cauca
31	1995	6.5 Mw	15	8	Tauramena, Casanare
32	2004	7.2 Mw	15	8	Bajo Baudó (Pizarro), Chocó
33	2013	7.0 Mw	162	7	Guaitarilla, Nariño

Fuente. Servicio Geológico Colombiano, 2022.

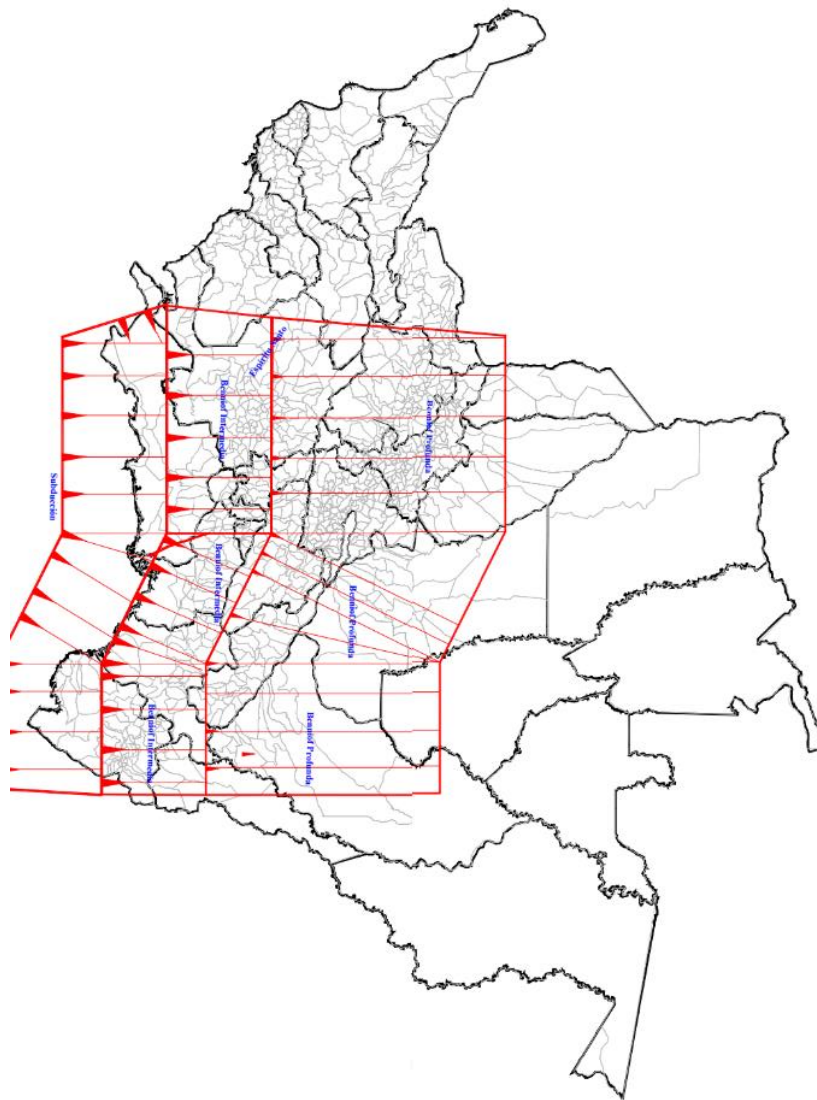
En el último siglo se registraron 4 sismos interplaca de magnitudes superiores o cercanas a 8.0 a profundidades de 10 y 160 km, relacionándolos a ambientes tectónicos de subducción con epicentros sobre el suroccidente de Colombia, que se sitúan a lo largo de la falla que separa la placa oceánica y que subduce de la placa continental suprayacente.

La zona de subducción se ha dividido en dos zonas principales, las cuales son:

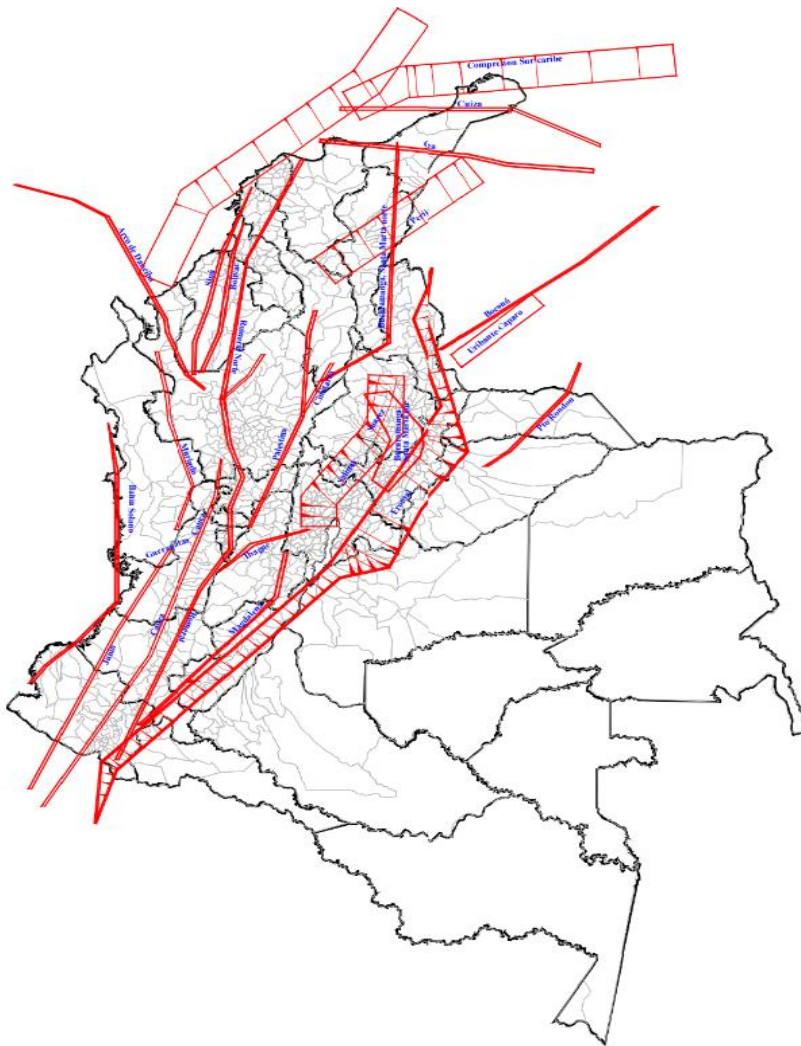
1. Segmento sur, el cual corresponde a la inmediación de la frontera entre Colombia y Ecuador, desde la altitud 1N hasta la latitud 5.5N.

2. Segmento Norte, el cual encuentra la prolongación de la fosa centroamericana, y se le debe la fuerte actividad en la zona limítrofe de Colombia y Panamá, y va desde la latitud 6.5N hasta la 7.3N.

Actualmente, el lugar donde existe la mayor amenaza sísmica de subducción es sobre las zonas como el límite Colombia-Panamá, región del antiguo Caldas y el Nido de Bucaramanga. Por otro lado, se han identificado zonas de Benioff en el ambiente de subducción mediante la ubicación de los hipocentros, lo que ha llevado a establecer que dichas zonas son más superficiales mientras más al norte se encuentren, y más profundas mientras más al sur, lo cual involucra necesariamente un cambio en buzamiento de las zonas subducidas, tal y como se evidencia en la Figura 54.



**Figura 54.** Zonas de subducción y de Benioff que genera amenaza sísmica en el territorio Colombiano  
**Fuente.** Uniandes, 2006



**Figura 55.** Zonas continentales que generan amenaza sísmica en el territorio colombiano  
**Fuente.** Uniandes, 2006

Por otro lado, hay sismos que son efecto de la actividad sísmica de los sistemas de fallas de la corteza superior, como son los de Honda, el Borde Llanero, Cúcuta, Popayán, Murindó y Armenia ocurridos en 1805, 1867, 1875, 1983, 1992 y 1999 respectivamente, que generaron grandes daños en distintas ciudades del territorio Colombiano, en la Figura 55, se evidencia las zonas continentales que generan amenaza sísmica en el territorio Colombiano (Espinosa 1996).

La ciudad de Ibagué ha sido afectada por diferentes sismos, la mayoría de ellos, con epicentros en el eje cafetero y los departamentos de Tolima y Cauca, sus magnitudes han sido importante y han producido daños catastróficos para algunas poblaciones, ver Tabla 20.



**Tabla 20.***Sismos Regionales notables*

No.	AÑO	MAGNITUD	PROF	INTENSIDAD MAXIMA	ÁREA EPICENTRAL
4	1736	6 Mw	15	8	Popayán, Cauca
2	1766	6.5 Mw	15	8	Buga, Valle del Cauca
9	1805	6.1 Mw	15	9	Honda, Tolima
9	1884	6.5 Mw	120	8	Herveo, Tolima
31	1935	6.1 Mw	15	8	Pueblo Rico, Risaralda
12	1938	7 Ms	150	8	Eje Cafetero, Colombia
16	1961	6.8 Ms	163	8	Eje Cafetero, Colombia
17	1962	6.5 Mw	64	8	Eje Cafetero, Colombia
18	1967	7 Mw	55	10	Colombia, Huila
53	1973	6.2 Mw	150	7	Salento, Quindío
25	1979	7.2 Mw	110	8	Eje Cafetero, Colombia
64	1983	5.6 Mw	15	9	Popayán, Cauca
30	1994	6.8 Mw	10	8	Páez (Belalcázar), Cauca
75	1999	6.1 Mw	15	9	Armenia, Quindío
81	2016	5.2 MI	13.2	6	Colombia, Huila

Fuente. Uniandes, 2006

**5.2. Desagregación de la Amenaza Sísmica**

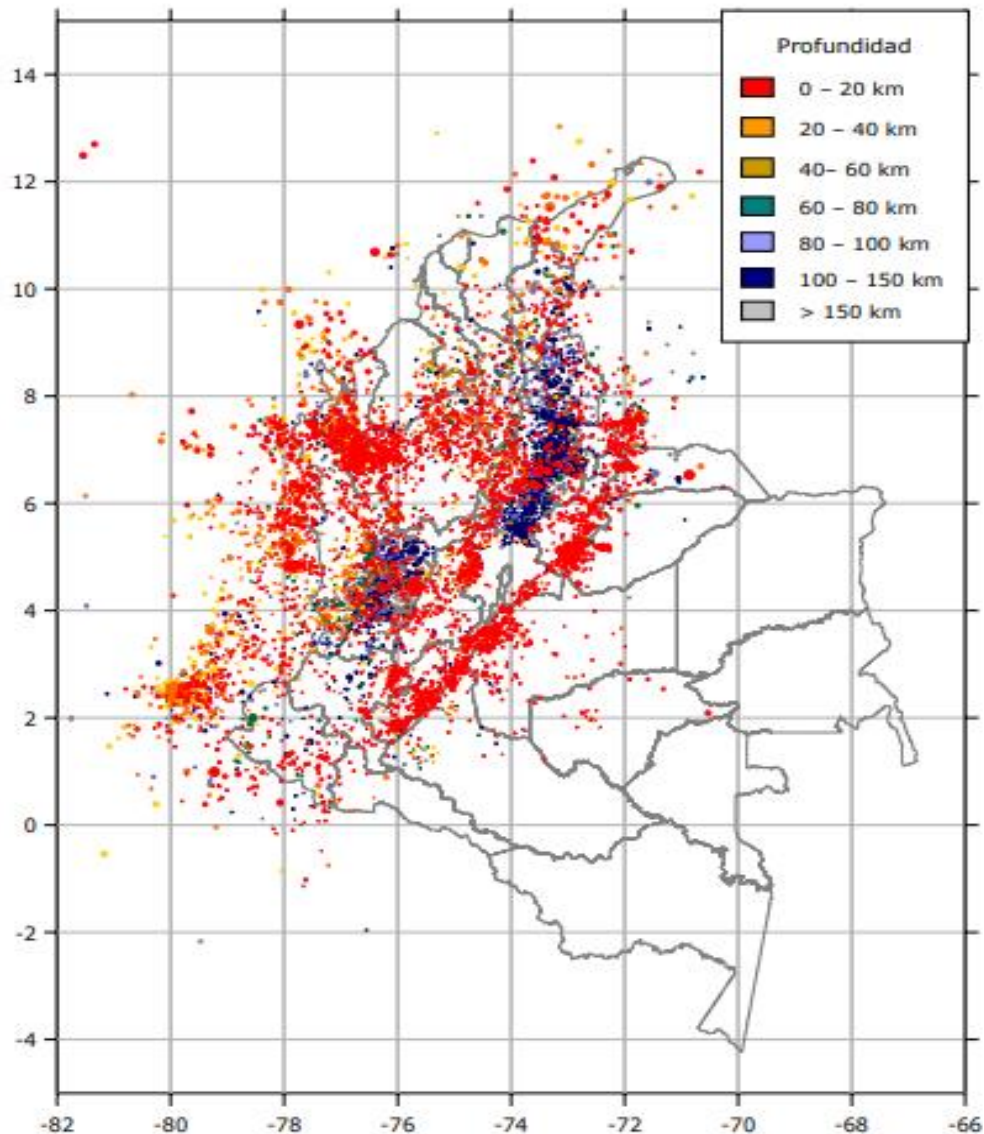
Mediante la desagregación de la amenaza, se logró obtener los pares de magnitud-distancia y las aceleraciones sísmicas para un periodo de retorno de 475 años. Para la determinación de la amenaza sísmica se relacionó y comparó la información de los siguientes estudios:

- Estudio previo de amenaza, respuesta dinámica, y microzonificación sísmica para la ciudad (Uniandes, 2006).
- Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia desarrollado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 2009).
- Armonización de los estudios de microzonificación sísmica con la norma NSR-10 para la ciudad realizado en el año 2012 (Alcaldía Municipal de Ibagué, 2012).
- Modelo Nacional de amenaza sísmica para Colombia, realizado por el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación Global Earthquake Model, 2020.

Como primera instancia, se realizó la revisión de lo establecido en el estudio previo de amenaza, respuesta dinámica, y microzonificación sísmica para la ciudad, el cual fue llevado a cabo por la universidad de los Andes en el año 2006, en dicho estudio se

desarrolló una metodología de cálculo de la amenaza teniendo en cuenta la teoría de la sismología clásica.

Haciendo uso de los registros sísmicos del catálogo sísmico del Servicio Geológico Colombiano, en el cual contenía 29332 sismos con magnitud superior a 2.5, ocurridos entre 1 de junio de 1993 y el 30 de Julio de 2006, y el catálogo sísmico actualizado a raíz del Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1997), conformaron una base de datos de alrededor 34189 eventos con magnitud superior a 2.5 ocurridos entre 1541 y 2006 (Figura 56).



**Figura 56.** Eventos sísmicos de la información recopilada para la amenaza sísmica del Estudio previo de amenaza, respuesta dinámica, y microzonificación sísmica para la ciudad.

**Fuente.** Uniandes, 2006.

La ciudad de Ibagué cuenta con dos fuentes dominantes, las cuales son:

1. Fuentes cercanas e intermedias entre estos esta la falla de Ibagué, Cucuana, Romeral, Palestina y Magdalena, cuyo trazo se encuentra sobre o a pocos kilómetros de la ciudad.
2. Fuentes de mayores distancias, pero con gran capacidad de liberación de energía como lo es la zona de Benioff intermedia la cual se encuentra justo debajo de la ciudad a una distancia aproximada de 100 y 150km.

Adicionalmente a lo anterior, existen otras fuentes sismogénicas regionales como son la falla frontal de la cordillera oriental, salinas y cauca, entre otras. En la Figura 57 se evidencia la distribución de las principales fallas regionales respecto a la ciudad de Ibagué, además en la Figura 58 se representa la ubicación regional de los eventos sísmicos con base en la información del catálogo nacional, con relación a la ubicación de las fallas.

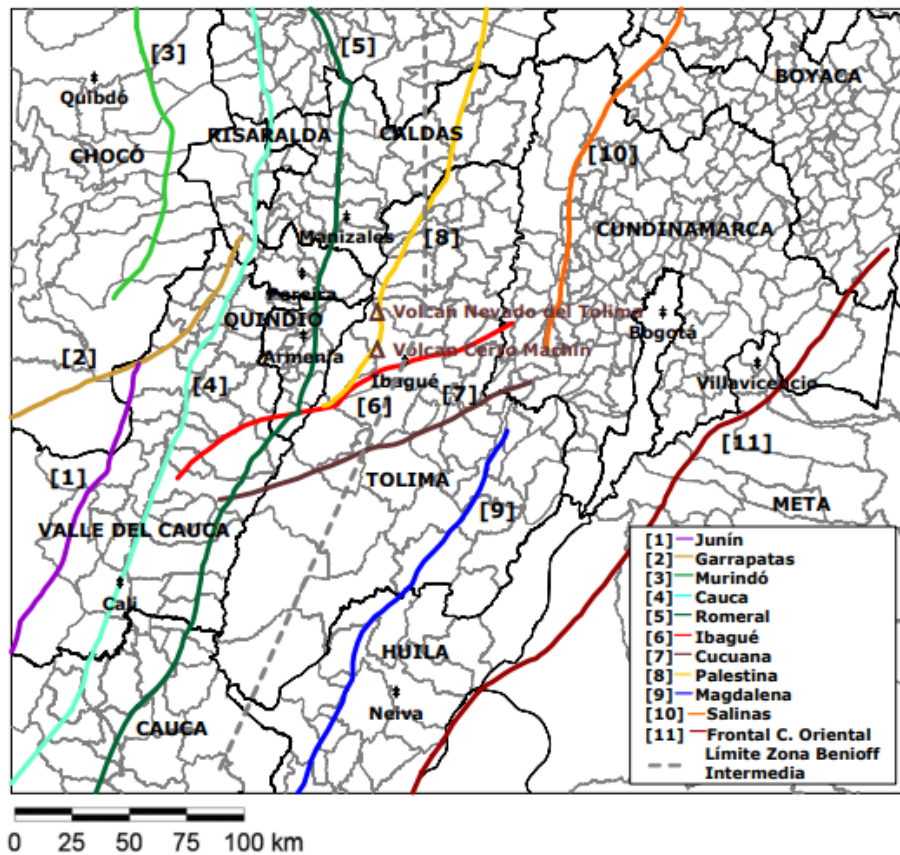
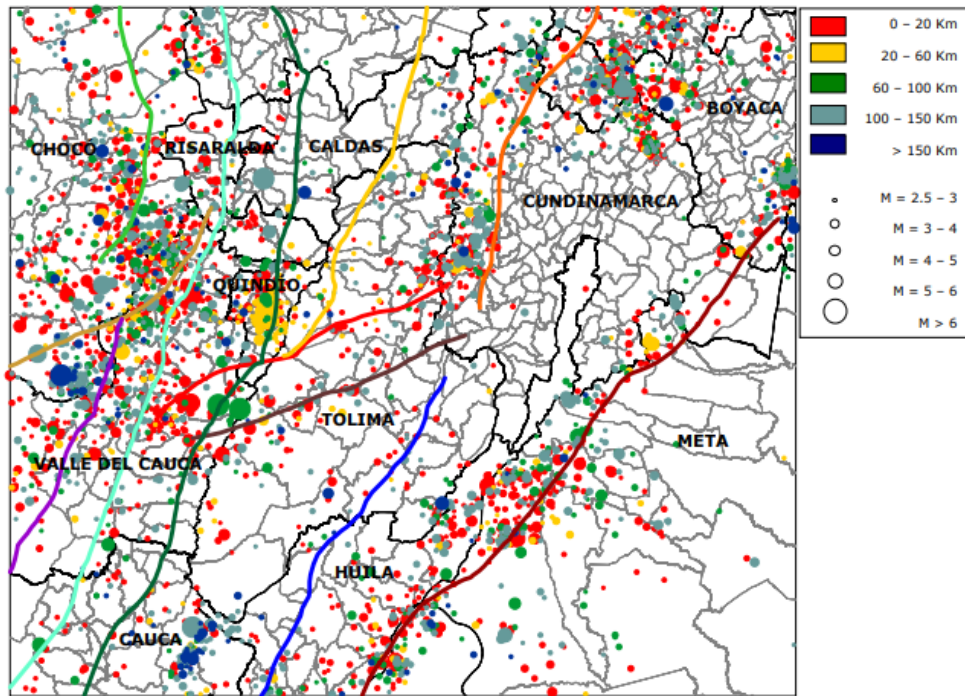


Figura 57. Distribución de las principales fallas regionales respecto a la ciudad de Ibagué  
Fuente. Uniandes, 2006.



**Figura 58.** Ubicación regional de los eventos sísmicos respecto a las fallas regionales.  
**Fuente.** Uniandes, 2006

Una vez recopilada la información se estimó la amenaza sísmica en terreno firme sin considerar los efectos de sitio, mediante la siguiente metodología

**Paso 1:** Distribución de fuentes sísmogénicas

**Paso 2:** Discretización de fuentes sísmogénicas

**Paso 3:** Modelo de atenuación

- Parámetros de atenuación
- M, R datos
- Espectros de Fourier Roca
- Modelación Suelo
- Oscilador
- Espectro de Fourier Resultante
- Valores máximos de  $A_{max}$ ,  $V_{max}$ ,  $D_{max}$ ,  $S_a$ ,  $S_v$  y  $S_d$
- Leyes de atenuación

**Paso 4:** Integración de la amenaza sísmica

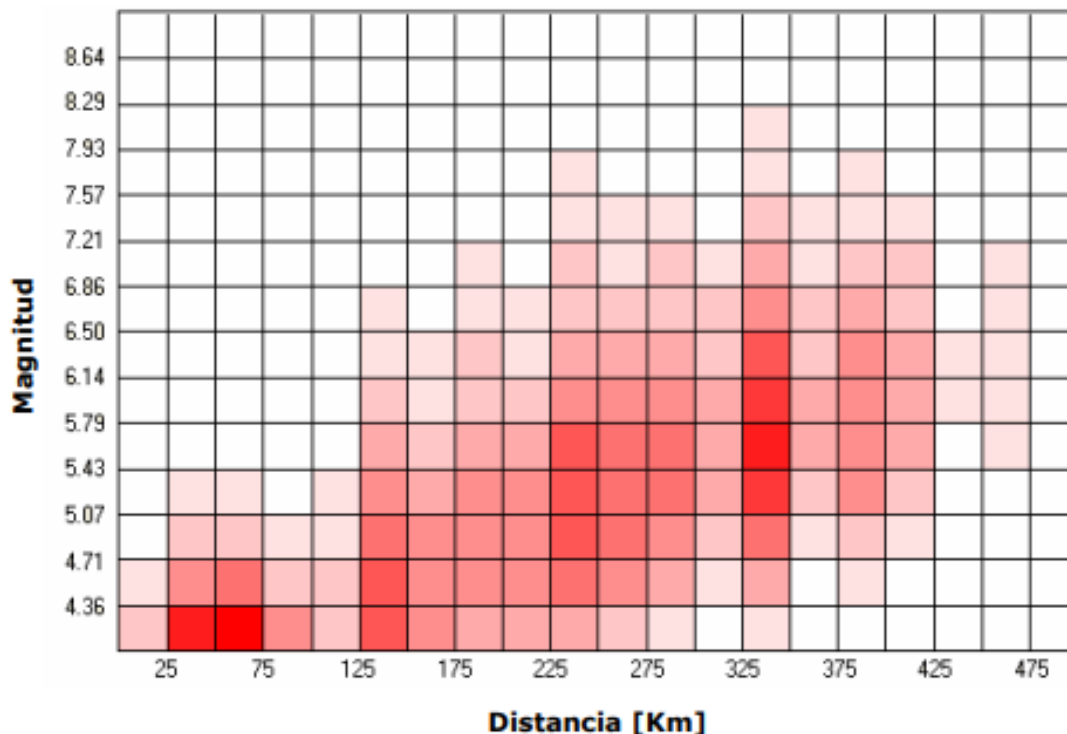
A partir de lo anterior, se estableció el Modelo Sismológico de la Falla de Ibagué a partir de una comparación entre los valores reportados por el Estudio General de Amenaza

Sísmica de Colombia (AIS, 1997), y el estudio de Paleosismología de la Falla de Ibagué (INGEOMINAS, 2004). Se establece dicho modelo con base en lo siguiente:

- La magnitud máxima probable para la Falla de Ibagué, para efectos de evaluación de amenaza local, se establece en 6.5. Este valor resulta inferior al anteriormente reportado en el estudio de Paleosismología de la falla, pero superior al estimado con base en la sismicidad observada.
- Los demás parámetros de sismicidad se establecen iguales a los determinados por el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, calculados a partir de la asignación geográfica de eventos sísmicos a la falla.

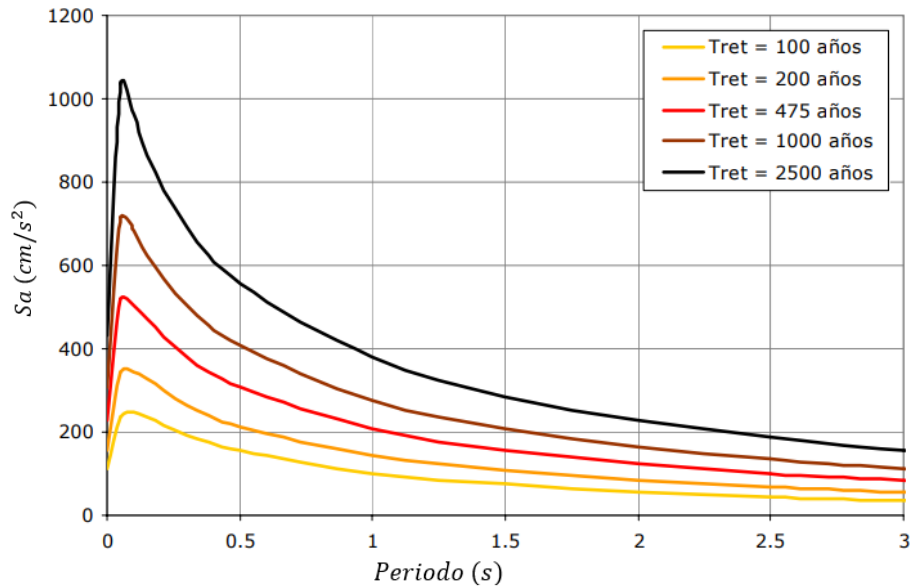
De acuerdo con lo anterior, la desagregación de la amenaza sísmica en función de diferentes combinaciones de magnitud distancia para un periodo de retorno de 475 años, es la evidenciada en la Figura 59 observando que los eventos que tiene mayor contribución en la amenaza sísmica de la ciudad son:

- Magnitudes entre 4,2 y 4,7 con distancias hipocentrales entre 25 y 75km
- Magnitudes de 5 y 6,5 y con distancias hipocentrales de 225 y 350 km

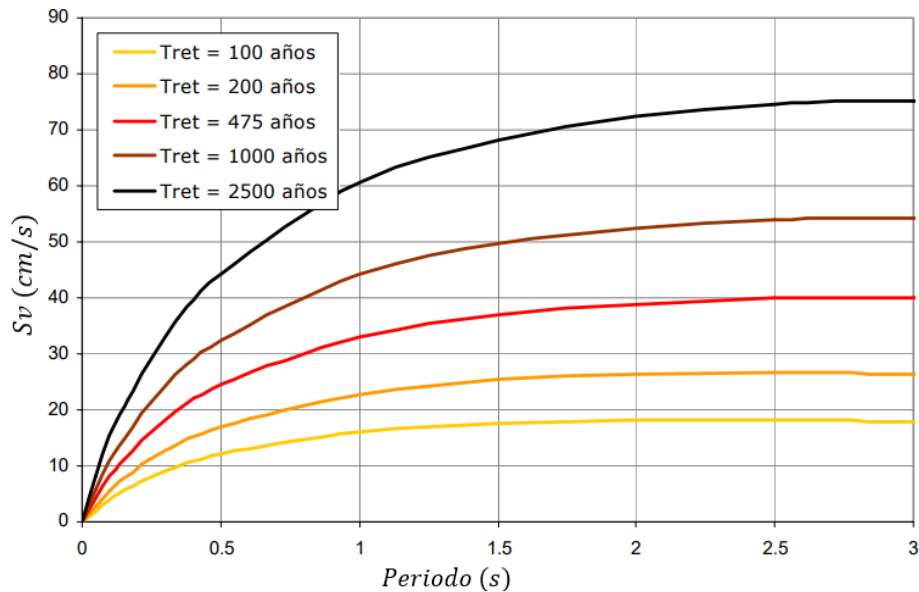


**Figura 59. Distribución de la amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué – Pares M-d**  
Fuente. Resultados Microzonificación sísmicas de Ibagué CAPÍTULO2, página 2-23, 2006

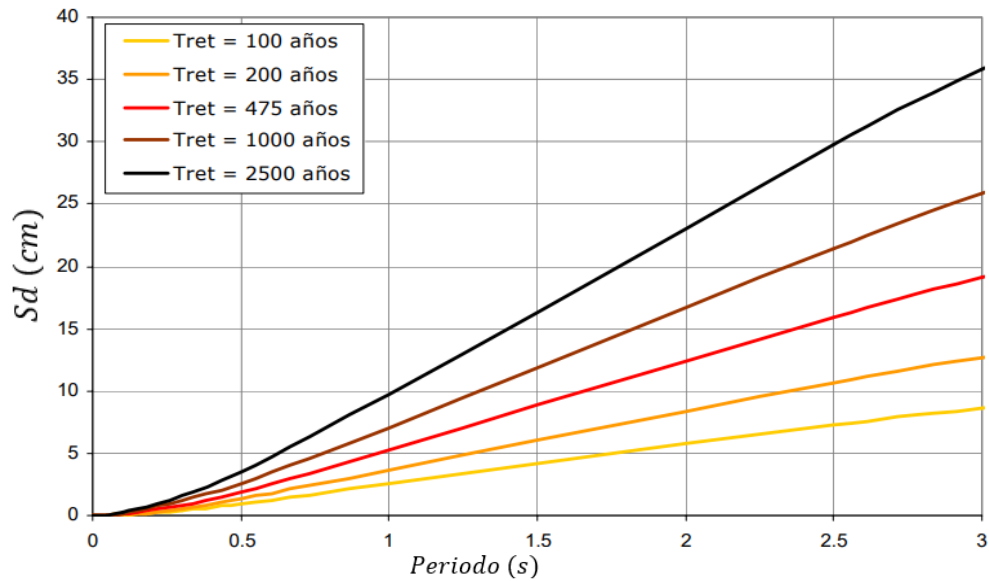
Las figuras 60- 63, muestran los diferentes espectros de amenaza uniforme para terreno calculados a diferentes periodos de retorno, tomados del estudio de Microzonificación sísmica de Ibagué del año 2006. En términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral se observa que para un periodo de retorno de 475 años, la aceleración espectral para periodos cero es de  $210\text{cm/s}^2$ .



**Figura 60.** Espectros de amenaza uniforme en términos de Aceleración Espectral  
**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmica de Ibagué CAPÍTULO2, página 2-24, 2006



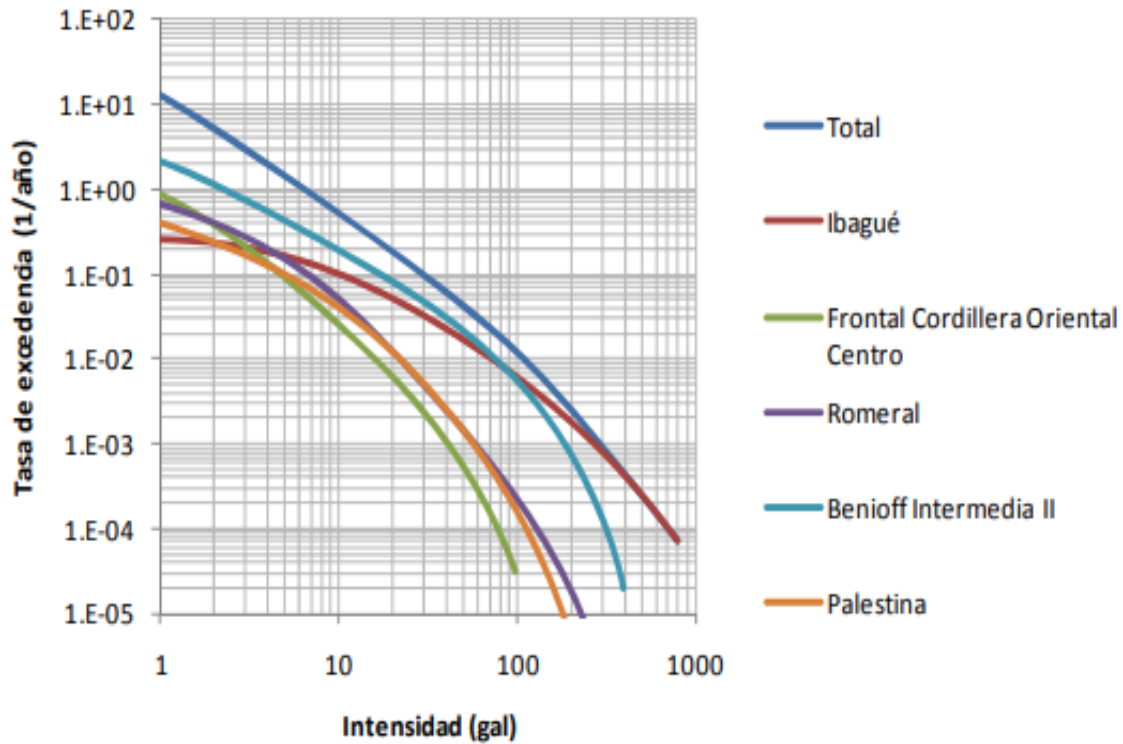
**Figura 61.** Espectros de amenaza uniforme en términos de Desplazamiento Espectral  
**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmica de Ibagué CAPÍTULO2, página 2-24, 2006



**Figura 62.** Espectros de amenaza uniforme en términos de Desplazamiento Espectral  
**Fuente.** Resultados Microzonificación sísmica de Ibagué CAPÍTULO2, página 2-24, 2006

Ahora bien, el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, llevado a cabo por la Asociación de Ingeniería Sísmica en el año 2009, empleó el programa CRISIS 2007, el cual permitió el cálculo de la amenaza sísmica por medio de un método probabilístico, teniendo en cuenta la geometría de las fuentes sísmicas (área, polilínea o punto), sismicidad de fuentes (proceso de Poisson o modelos del temblor característico) y las relaciones de atenuación de las intensidades sísmicas.

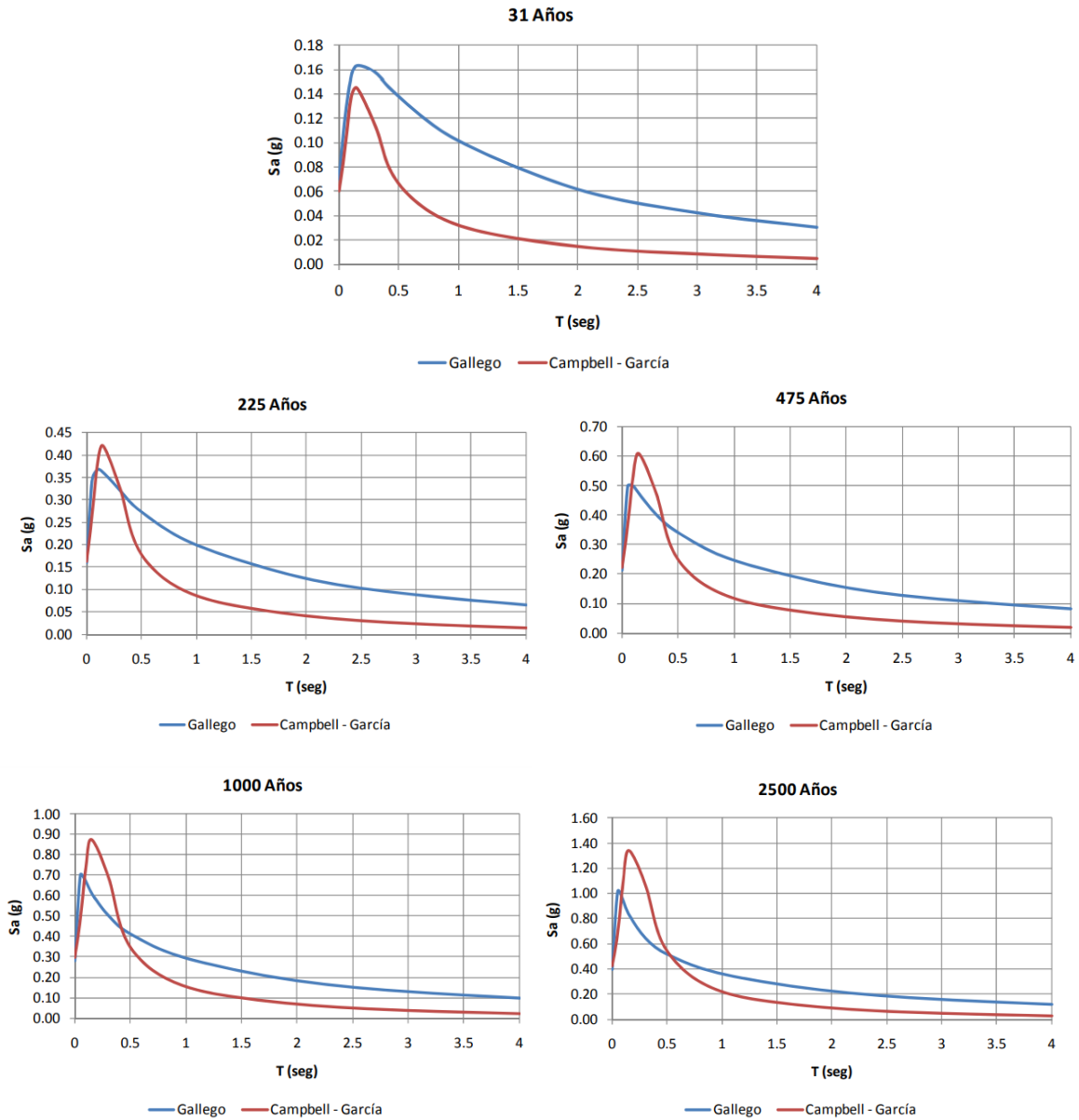
Una vez obtenido todo lo anterior, se logran obtener las gráficas de tasas de excedencias con respecto a las aceleraciones, y así lograr identificar las principales fuentes sismogénicas que representan la amenaza sísmica del sitio. En la Figura 63 se muestra que las fuentes sismogénicas que mayor importancia para un periodo retorno de 475 años (tasa de excedencia de 0.002) son la zona de Benioff Intermedia II y falla de Ibagué con unas intensidades de  $160\text{cm}/\text{s}^2$  y  $195\text{cm}/\text{s}^2$ , respectivamente.



**Figura 63.** Curva de amenaza sísmica para diferentes fuentes sismogénicas  
**Fuente.** Estudio nacional de amenaza sísmica, AIS,2009.

Haciendo uso de las relaciones de atenuación dadas por Campbell- García y gallego (2000), se adquirieron los espectros de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno (31, 225, 475, 1000 y 2500), tal y como se evidencia en la Figura 64.





**Figura 64.** Espectro de amenaza uniforme para un periodo de retorno (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 1000 años y (e) 2500 años

**Fuente.** Estudio nacional de amenaza sísmica, AIS,2009.

Otro de los estudios indagados para la obtención de la desagregación de la amenaza sísmica de Ibagué, fue el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia desarrollado en el año 2018 por el Servicio Geológico Colombiano y la Fundación Global Earthquake Model, el cual hizo uso de un enfoque probabilista donde la amenaza sísmica es evaluada como la probabilidad con que un cierto valor de amenaza, definido por un parámetro del movimiento del terreno, es excedido en una determinada región de estudio (Cornell, 1968).

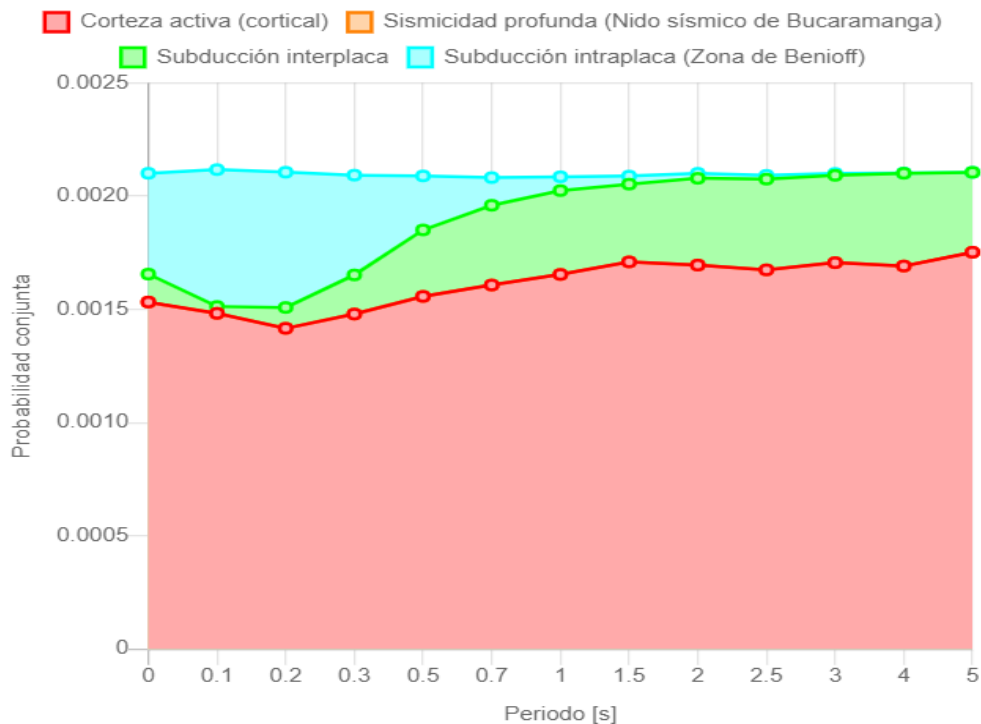
Para el cálculo de la amenaza en “Roca Firme”, llamando así a todos los estratos de suelos que presenten velocidades de onda mayores o iguales a 760 m/s, implementaron el motor de cálculo OpenQuake (Pagani et al., 2014<sup>a</sup>), así mismo, para evaluar la amenaza sísmica hicieron uso de metodologías propuestas por Budnitz et ál. (1997), Reiter (1991) y McGuire (2004), teniendo en cuenta que el principal objetivo del análisis era el estimar, para un sitio determinado, la probabilidad de excedencia de diferentes intensidades del movimiento del suelo, considerando todos los sismos que puedan ocurrir.

Asumiendo supuestos encontraron lo siguiente:

- La sismicidad de una fuente sísmica no afecta la probabilidad de ocurrencia de un evento en las otras fuentes.
- Cada fuente sismogénica es capaz de generar sismos independientes, es decir, la ocurrencia de actividad sísmica en una fuente no afecta la probabilidad de ocurrencia de otra potencial ruptura en la misma fuente sísmica.

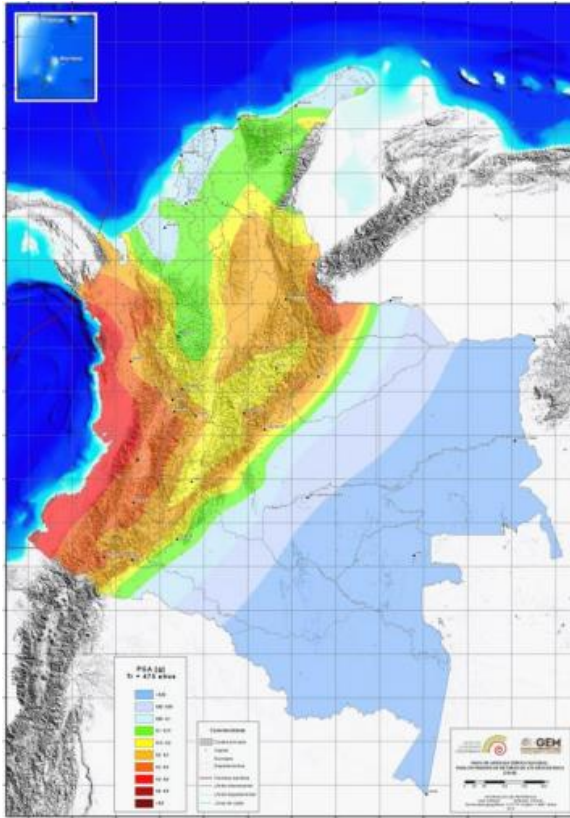
Ahora bien, tomando los resultados de la evaluación de la Amenaza Sísmica nacional llevado a cabo en el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia, se logró evidenciar que en los departamentos del eje cafetero (Quindío, Caldas, Risaralda), localizados a más de 150km de la costa pacífica, se estiman aceleraciones que varían entre  $147\text{cm/s}^2$  y  $295\text{cm/s}^2$ . Además de acuerdo con la participación por ambientes tectónicos, la mayor probabilidad se presenta para el ambiente cortical activa seguido de la amenaza intraplaca (zona de Benioff) para periodos de hasta 1s para un periodo de retorno de 475 años, tal y como se evidencia en la Figura 65.

### Participación por ambientes tectónicos

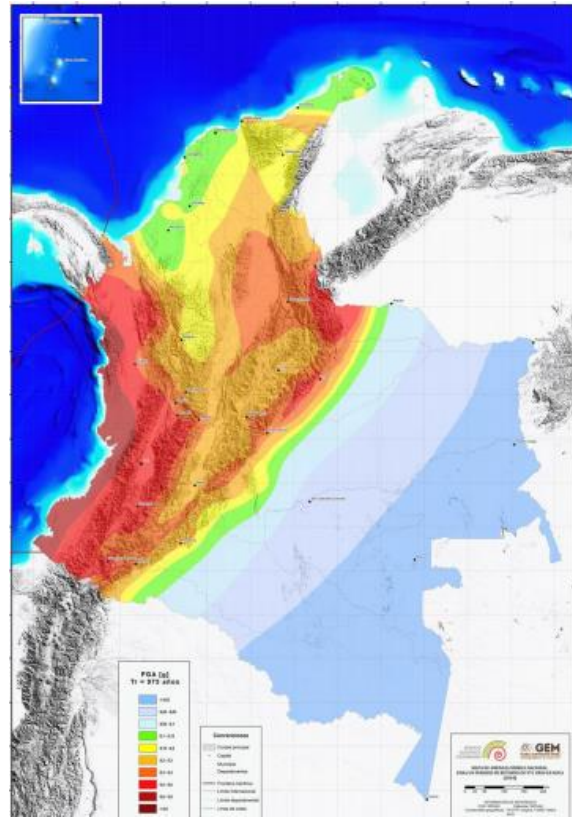


**Figura 65.** Participación por ambientes tectónicos para periodo de retorno de 475 años  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.

Entre los sismos más importantes que han ocurrido sobre la zona se encuentran los de 1938 (7.0 Mw, a 150km de profundidad), 1962 (6.5 Mw, a 64km de profundidad) y 1999 (6.1 Mw, a 15km de profundidad), reiterando que la amenaza sísmica está dada por los sismos que se generen sobre la zona de Benioff y corticales. Ahora bien, para la ciudad de Ibagué se estiman aceleraciones picos en roca firme de  $245.16\text{cm/s}^2$  y  $372.65\text{cm/s}^2$  para los periodos de retorno de 475 años y 975 años, respectivamente (Ver Figura 66 y 67).



**Figura 66.** Mapa de aceleraciones pico (PGA) para periodo de retorno de 475 años.  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020

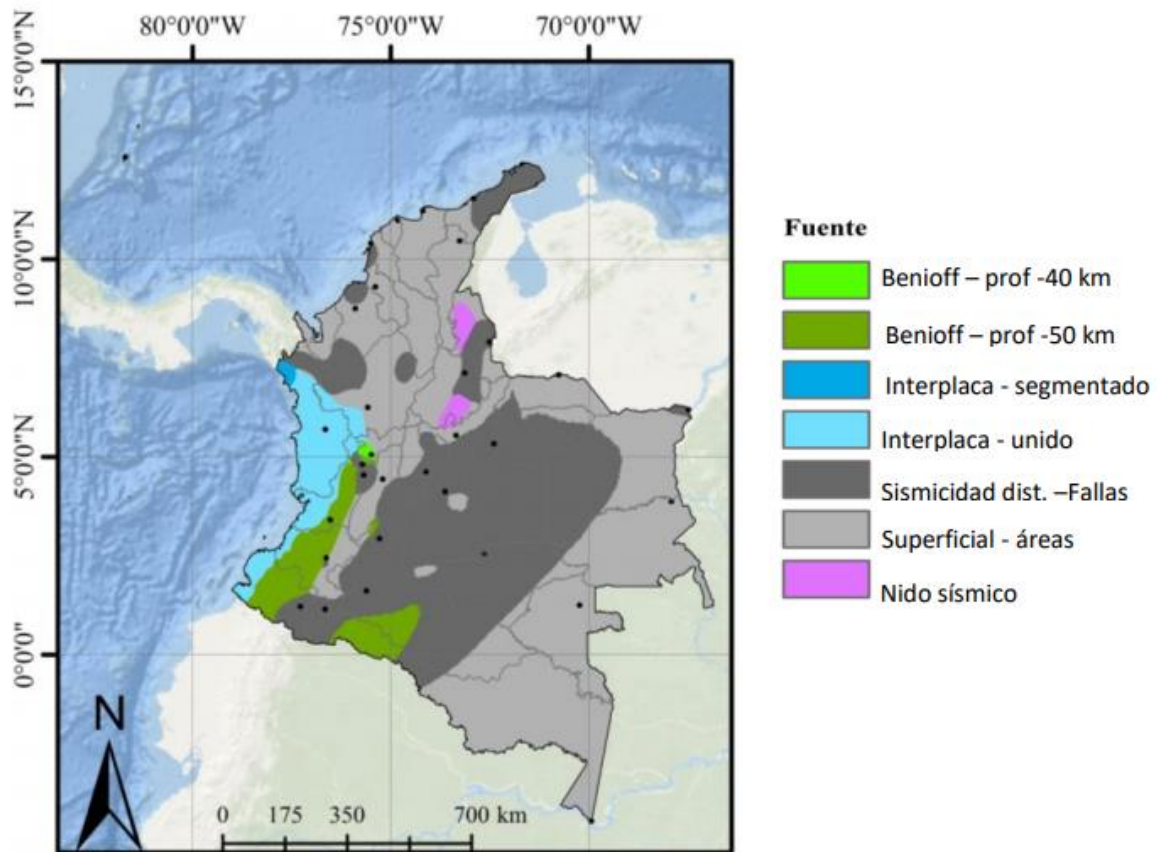


**Figura 67.** Mapa de aceleraciones pico (PGA) para periodo de retorno de 975 años.  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.

En la Figura 68, se evidencian los ambientes tectónicos que producen las aceleraciones más altas para periodos de retorno de 475 años, evidenciando lo siguiente:

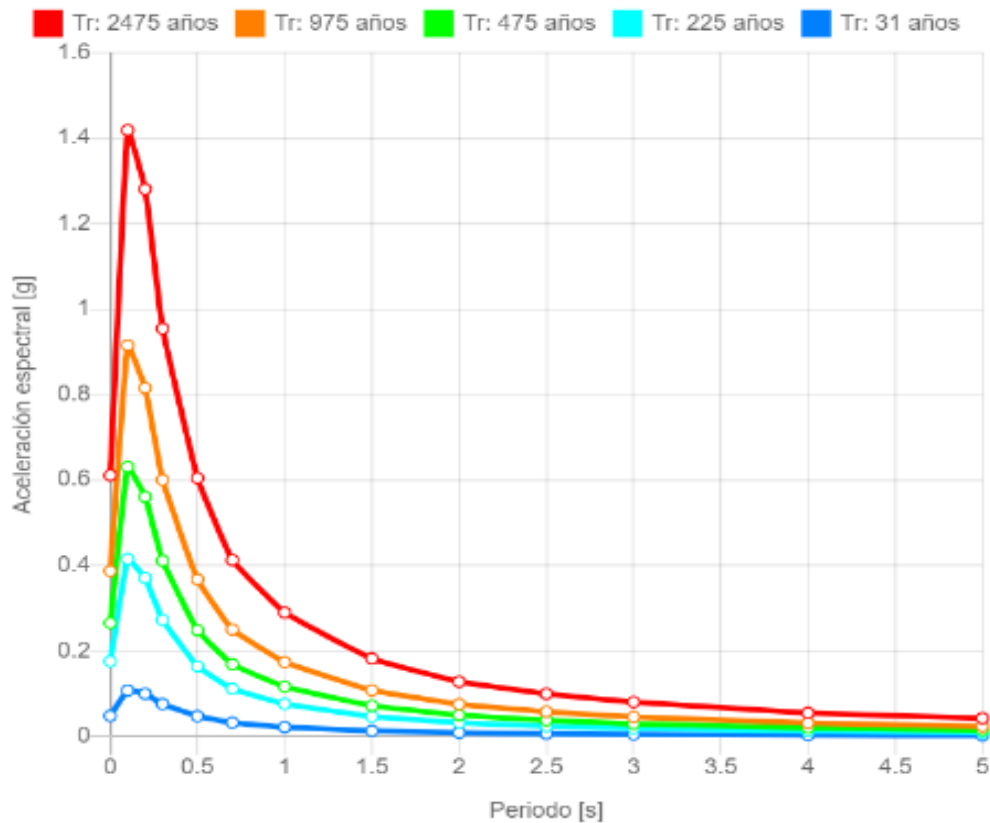
1. Las fuentes interplaca (del modelo unido y segmentado) producen las aceleraciones pico más altas para la zona pacífica. Hacia el norte, esta zona tiene una extensión cercana a 200km desde la costa pacífica, abarcando el departamento de Chocó. Hacia el sur, en los departamentos de Nariño y Cauca, esta zona se extiende a menos de 50km de la costa pacífica.
2. Las fuentes tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Nariño, Cauca y Valle, llegando incluso hasta Quindío, en una zona contigua a la de sismos interplaca. También se observan zonas de mayores aceleraciones de esta fuente hacia la zona central del departamento de Putumayo.
3. El nudo sísmico de Bucaramanga contribuye en mayor medida a la amenaza sísmica del noroccidente del departamento de Norte de Santander y hacia el sur del departamento de Santander.

4. Al norte del departamento de La Guajira y sobre las cordilleras central y oriental se observa que las mayores aceleraciones corresponden a fuentes de los modelos de sismicidad distribuida y de fallas activas
5. El modelo de fuentes superficiales de sismicidad equiprobable produce las mayores aceleraciones en la costa atlántica, en los llanos orientales y parte de la Orinoquía, en el eje cafetero y gran parte de los departamentos de Antioquia y Tolima.
6. Las fuentes de tipo Benioff son relevantes para los departamentos de Cauca, Valle, y Tolima.



**Figura 68.** Ambientes tectónicos de mayor aceleración pico (PGA) – Tr= 475 años  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.

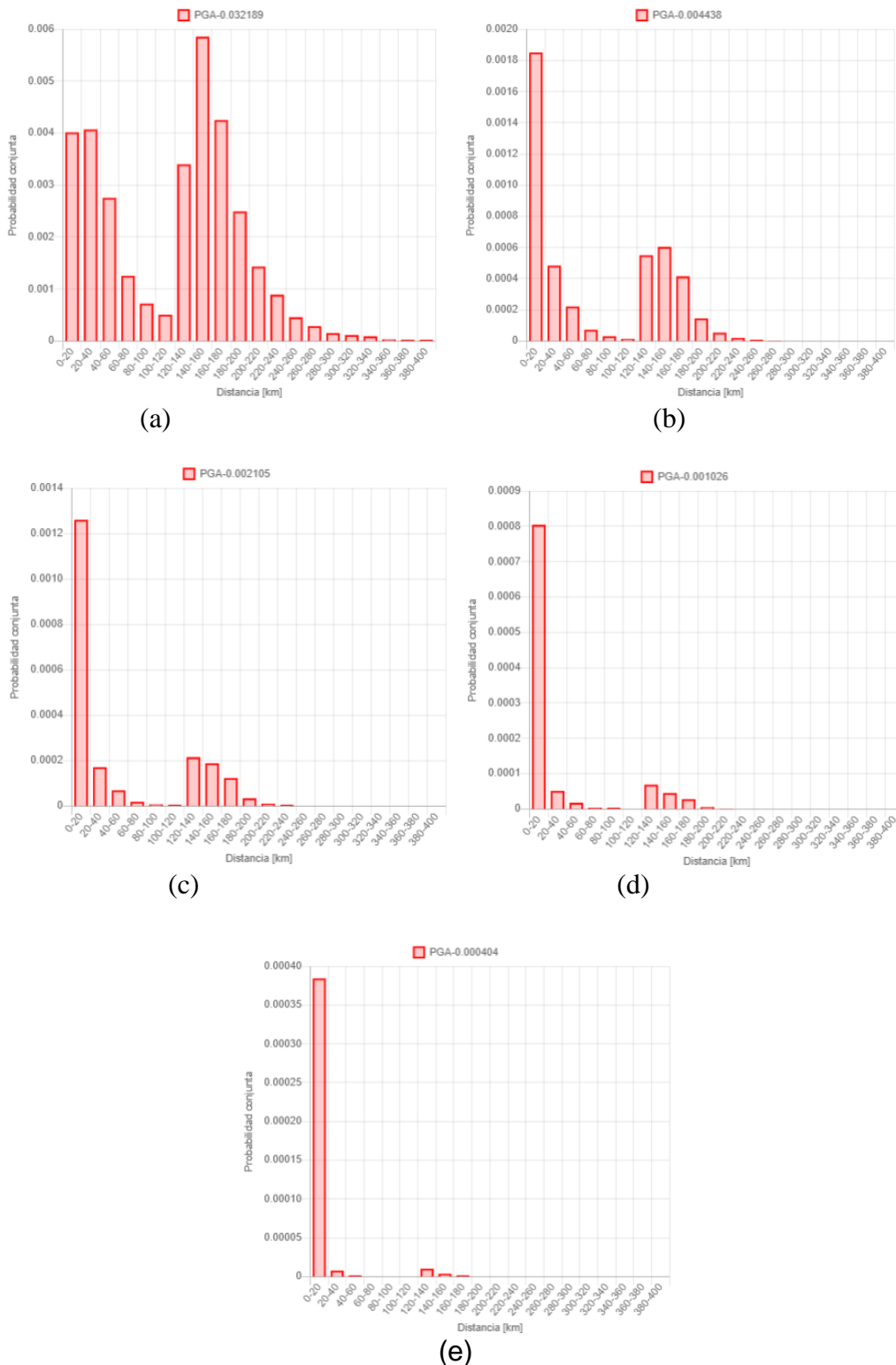
Para la ciudad de Ibagué, en el Modelo de Amenaza Sísmica de Colombia, se evidencia los espectros de amenaza uniforme, los cuales arrojan las aceleraciones espectrales en roca para diferentes periodos de retorno, valores los cuales son  $47.39\text{cm/s}^2$ ,  $172.48\text{cm/s}^2$ ,  $260.45\text{m/s}^2$ ,  $379.76\text{cm/s}^2$  y  $599.49\text{cm/s}^2$ , para los periodos de retorno de 31, 225, 475, 975 y 2475 años, respectivamente (Figura 69).



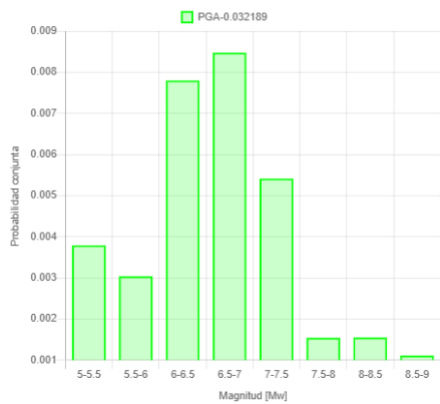
**Figura 69.** Espectros de Amenaza Uniforme en roca  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.

Al identificar a mayor detalle la desagregación de la amenaza se puede observar la participación de las distancias y magnitudes en la ocurrencia o no de eventos sísmicos para diferentes periodos de retorno; en las figuras 70 y 71, se evidencia que para los periodos de retorno de 31 años y 225 años existe gran probabilidad de ocurrencia de actividad sobre eventos sísmicos a profundidad de 0-60km y de 120-220km, esta probabilidad baja significativamente en los periodos de retorno de 475años, al presentarse una distribución de probabilidad mayor para los eventos sísmicos de 0 a 20km de distancia.

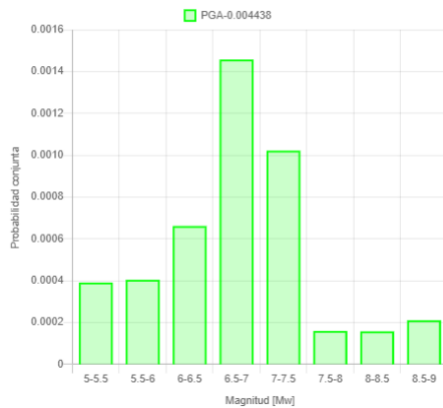
Ahora bien, para la participación de las magnitudes en la ocurrencia de eventos sísmicos, se evidencia que en todos y cada uno de los periodos de retorno, las magnitudes de mayor importancia son las que van desde aproximadamente 4.5 a 7.5 Mw.



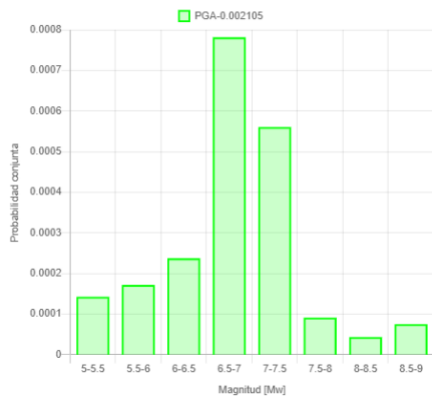
**Figura 70.** Participación de distancias (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 975 años y (e) 2475 años  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.



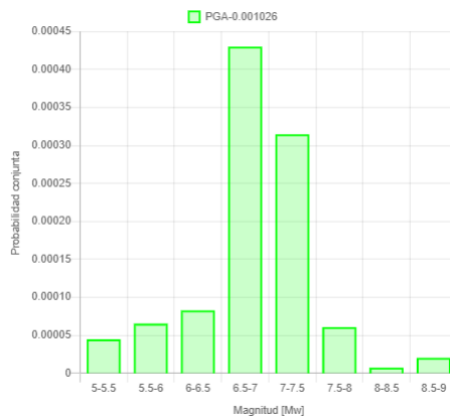
(a)



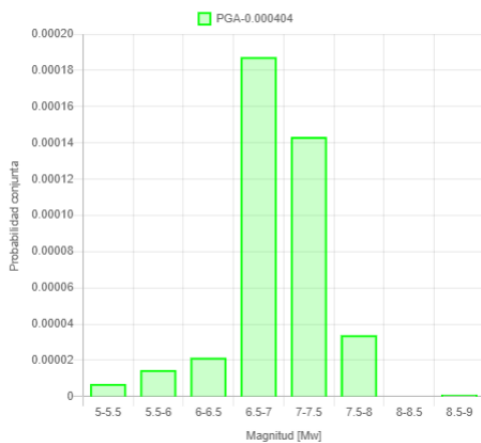
(b)



(c)



(d)



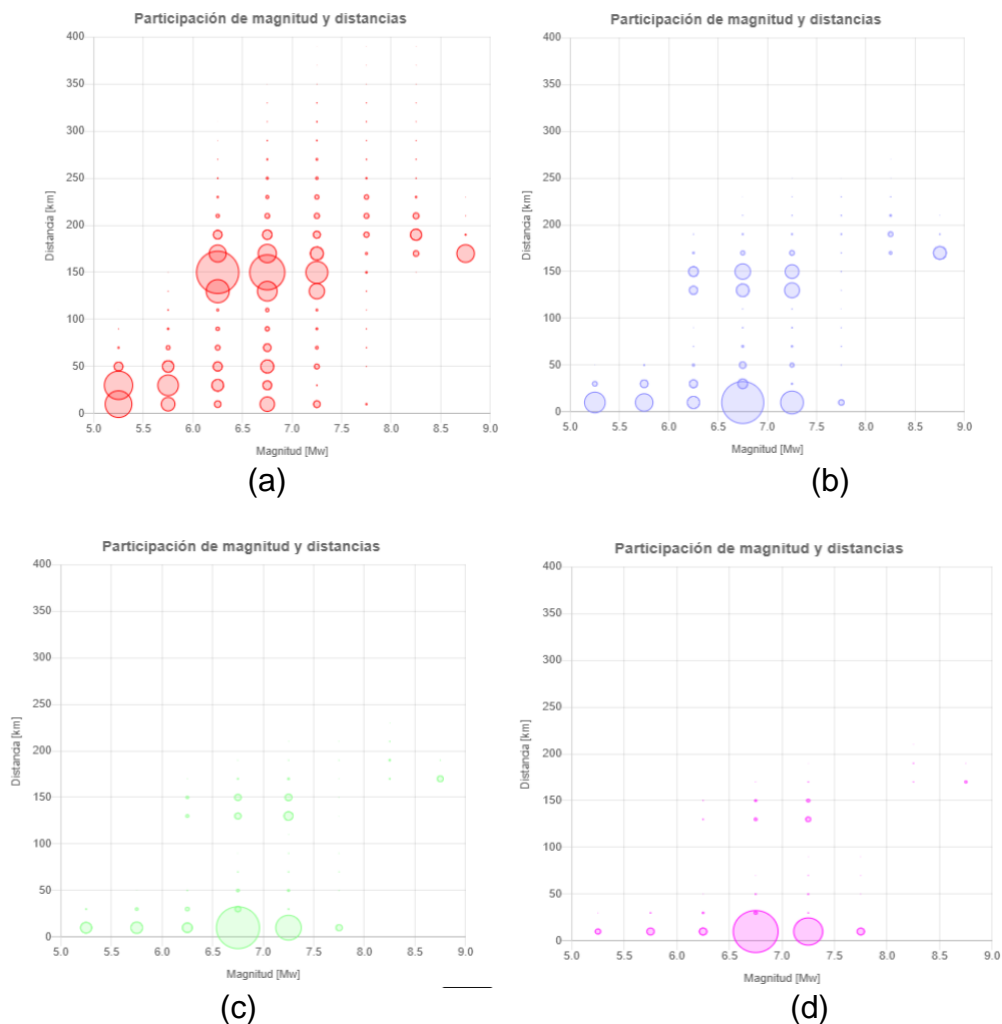
(e)

**Figura 71.** Participación de magnitudes (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años, (d) 975 años y (e) 2475 años  
**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.



En la Figura 72, se evidencian los pares de magnitud – distancia, para los distintos periodos de retorno y se evidencia lo siguiente:

- Tr: 31 años – Eventos sísmicos de 0 a 110km con magnitudes entre 5.2 y 7.5 Mw y eventos sísmicos de 100 a 190km con magnitudes entre 6.0 y 8.8 Mw.
- Tr: 225 años – Eventos sísmicos de 0 a 80km con magnitudes entre 5.2 y 7.5 Mw y eventos sísmicos de 100 a 180km con magnitudes entre 6.2 y 8.8 Mw.
- Tr: 475 años – Eventos sísmicos de 0 a 50km con magnitudes entre 5.2 y 7.5 Mw y eventos sísmicos de 100 a 150km con magnitudes entre 6.2 y 8.8 Mw.
- Tr: 975 años – Eventos sísmicos de 0 a 50km con magnitudes entre 5.2 y 7.5 Mw y eventos sísmicos de 100 a 140km con magnitudes entre 6.2 y 8.8 Mw.



**Figura 72.** Desagregación pares magnitud distancia para diferentes periodos de retorno, (a) 31 años, (b) 225 años, (c) 475 años y (d) 975 años

**Fuente.** Servicio Geológico Colombiano, 2020.

### 5.3. Comparación de metodologías

Con base en las desagregaciones de amenaza sísmica, dadas en cada uno de los estudios revisados con anterioridad, se presentan las tablas 21 y 22, en las cuales se realiza la comparación de los pares magnitud distancia y aceleraciones espectrales en roca para diferentes periodos de retorno, respectivamente.

**Tabla 21.**

*Desagregación de la amenaza, pares de magnitud-distancia por periodo de retorno.*

ESTUDIO	PERIODO DE RETORNO (Años)	AMBIENTE TECTONICO	RRUP (km)		MAGNITUD Mw	
			MIN	MAX	MIN	MAX
MODELO NACIONAL DE AMENAZA SISMICA DE COLOMBIA 2020	31	CORTICAL	0	110	5.2	7.8
	225		0	80	5.2	7.8
	475		0	50	5.2	7.8
	975		0	50	5.2	7.8
	2475		0	30	5	7.8
	31	INTRAPLACA	100	250	6	8.8
	225		100	200	6.2	8.8
	475		100	180	6.2	8.8
	975		110	170	6.2	8.8
	2475		120	150	6.2	8.8
MICROZONIFICACION SISMICA IBAGUÉ 2006	475	CORTICAL	25	75	4.2	4.7
	475	INTRAPLACA	225	350	5	6.5

*Fuente. Propio.*

**Tabla 22.**

*Aceleraciones espectrales en roca para diferentes periodos de retorno*

PERIODO DE RETORNO	MICROZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE IBAGUÉ, 2006	Sa (cm/s <sup>2</sup> )		MODELO NACIONAL DE AMENAZA SISMICA, 2020
		ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SISMICA DE COLOMBINA, 2009		
		CORTICAL	INTRAPLACA	
31	110 (100 años)	32.5	40	47.411
225	150 (20 años)	140	120	172.53
475	220.00	195	150	260.54
1000	300.00	280	198	379.89
2500	420.00	400	250	599.69

*Fuente. Propio.*

#### 5.4. Selección y procesamiento de eventos sísmicos

El catálogo sísmico local de las cuatro estaciones de la RENAC en el municipio de Ibagué consta de 370 registros sísmicos de tres componentes provenientes, en su mayoría, de eventos con magnitudes bajas (<5 Mw) y distancias hipocentrales superiores a los 100 km.

Aunque el catálogo sísmico cuenta con las características de magnitud, distancias y fuentes de participación más importantes de la zona, las amplitudes de las intensidades sísmicas registradas son muy bajas para ser consideradas dentro de la familia de acelerogramas, además los valores de aceleraciones espectrales en roca para estos eventos no superan los  $60\text{cm/s}^2$ . Por lo anterior, es necesario recurrir a otros catálogos sísmicos para obtener eventos que representen adecuadamente las características del modelo de amenaza sísmica presentado.

Por otra parte, y para efectos de tener una referencia regional, el estándar americano del ASCE, 2017 presenta los requisitos mínimos para definir familias de acelerogramas como requisito indispensable para los análisis dinámicos. Los requisitos principales que establecen estos documentos son los siguientes:

- Numero plural de acelerogramas: mínimo 3 por cada tipo de fuente sísmica representativa de la amenaza.
- Acelerogramas registrados en estaciones en roca.
- Componentes horizontales de los registros.
- Deben ser compatibles con:
  - Condiciones que afecten su contenido frecuencial.
  - Entorno tectónico
  - Distancia epicentral, hipocentral, RJB o RRUP
  - Tipo de fuente sismogénica que los genera
  - Niveles de aceleración y velocidad máxima horizontal que representan según lo estudiado para el caso en particular.

Con base en la comparación de la desagregación de la amenaza realizada en el numeral anterior, se toma como referencia la información entregada por el modelo de Amenaza Sísmica de Colombia del año 2020, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano, además se hace uso de la Aceleración Espectral en Roca para cada ambiente tectónico, dada por el Estudio de Amenaza Sísmica de Colombia (2009). Para mostrar de forma adecuada la amenaza sísmica de Ibagué, es necesario realizar la selección de registros sísmicos sobre perfiles de suelos con velocidad de onda de corte mayores o iguales a 760 m/s (asimilable a roca), y que conserven las características de los pares magnitud- distancia con respecto a la desagregación identificada (ver Tabla 23).

**Tabla 23.**

*Pares de magnitud-distancia y Aceleración espectral en roca, tomados para la selección de los registros sísmicos.*

ESTUDIO	PERIODO DE RETORNO (Años)	AMBIENTE TECTONICO	RRUP (km)		MAGNITUD Mw	
			MIN	MAX	MIN	MAX
<b>MODELO DE AMENAZA SISMICA DE COLOMBIA 2020</b>	475	CORTICAL	0	50	5.2	8.8
	475	INTRAPLACA	100	180	6.2	8.8
PERIODO DE RETORNO	Sa (cm/s <sup>2</sup> )					
	MICROZONIFICACION SISMICA DE LA CIUDAD DE IBAGUÉ, 2006	MODELO NACIONAL DE AMENAZA SISIMICA, 2020				
			CORTICAL	INTRAPLACA		
475	220		260	150		

*Fuente. Propio.*

Para la selección de eventos sísmicos, se hizo uso de los acelerogramas seleccionados en el estudio de Actualización de la Microzonificación Sísmica del Municipio de Ibagué, desarrollado en el año 2020 por parte de la Dirección de Gestión y Atención de Desastres y la Universidad de los Andes, en la cual se realizó la desagregación propia de la amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué que presenta una gran similitud en los pares de magnitud distancia y aceleraciones espectrales de referencia tomados en el presente proyecto. En la Tabla 24 se muestran de manera confiable los eventos sísmicos que representan la amenaza sísmica en el polígono comprendido entre la carrera 5ta y Avenida mirolindo y calles 60 y 145.

**Tabla 24.***Características de los eventos sísmicos seleccionados*

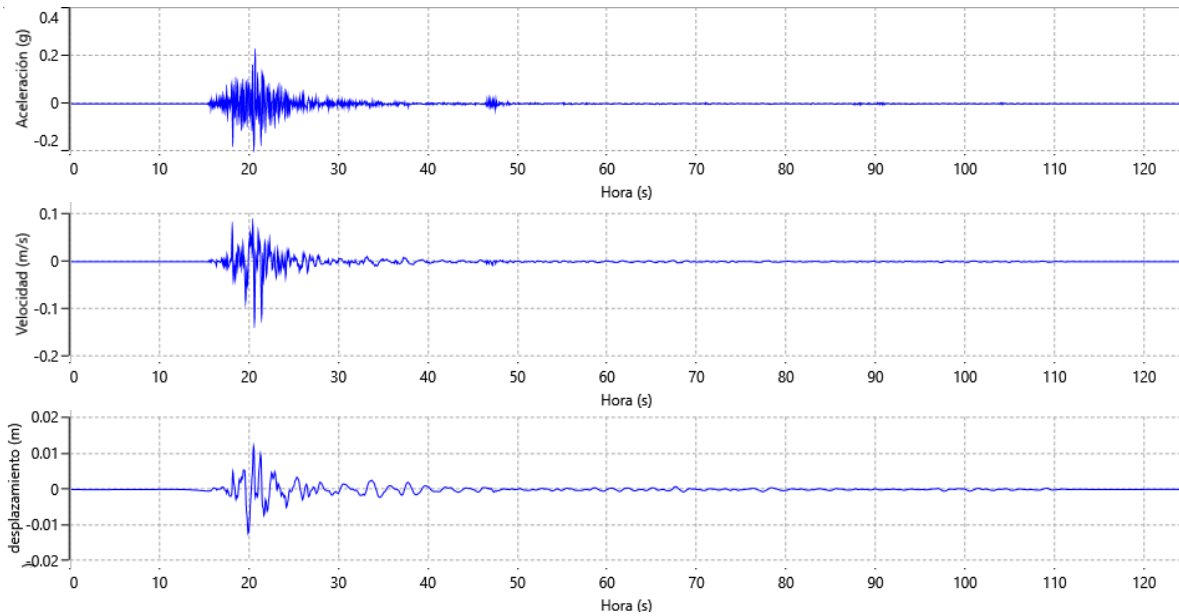
#	Ambiente tectónico	Descripción (Estación)	Año	Mw	Prof. (km)	Rrup (km)	PGA (g)	Componente
01	Cortical	San Fernando (Pasadena)	1971	6.6	0	21.5	0.25	E
02	Cortical	Iwate (IWT010)	2008	6.9	0.57	16.27	0.25	N
03	Cortical	Parkfield – Turkey Flat #1 (0M)	2004	6.0	2.50	5.29	0.25	E
04	Cortical	Kobe University	1995	6.9	0.19	0.92	0.25	N
05	Intraplaca	Tarapaca (Tara06r)	2005	7.8	114.90	106.220	0.15	N
06	Intraplaca	Tarapaca (Tara09r)	2005	7.8	114.90	106.455	0.15	N
07	Intraplaca	Tarapaca (Tara08r)	2005	7.8	114.90	106.975	0.15	N

**Nota.** La PGA corresponde a la aceleración escalada de cada uno de los eventos sísmicos de acuerdo con las características definidas.

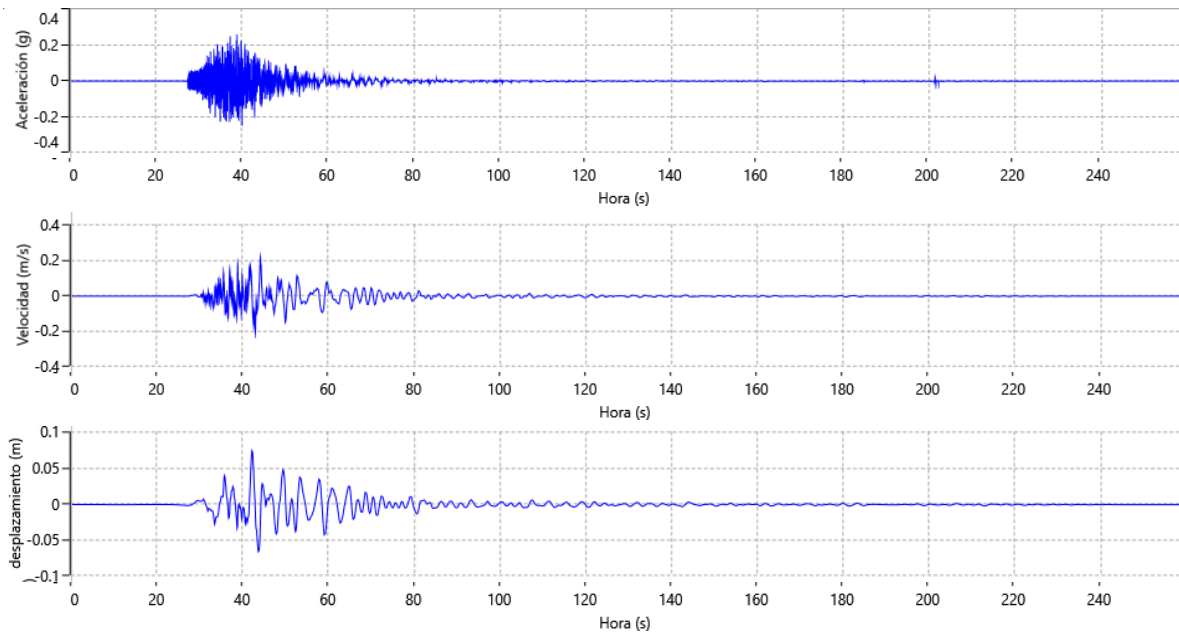
Una vez, seleccionados los acelerogramas que representan la amenaza sísmica de la zona de estudio, se realizó la corrección y procesamiento de cada una de las señales con la finalidad obtener las características del sismo, entre ellas, la aceleración, desplazamiento y desplazamiento máximo y periodo fundamental del sismo, así mismo, realizar el escalamiento del factor de amplificación garantizando que este no resultara mayor de dos veces ni menos de la mitad de la aceleración objetivo para el análisis de respuesta sísmica.

Las señales sísmicas cuentan con una serie de información sobre la forma y características de la ruptura en la fuente sismogénica, entre ellas con parámetros que representan el contenido frecuencial y la aceleración del sitio, así mismo, la señal es alterada y modificada a medida que la onda sísmica avanza por los distintos mantos rocosos y suelos. Por lo anterior, es necesario realizar el procesamiento de las señales por medio del uso del del software SeismoSignal V 4.3, el cual realiza la corrección de la señal por la respuesta propia del instrumento, reduce del ruido presente en la misma, establece un procedimiento iterativo de corrección por línea base y un filtrado en el dominio de la frecuencia.

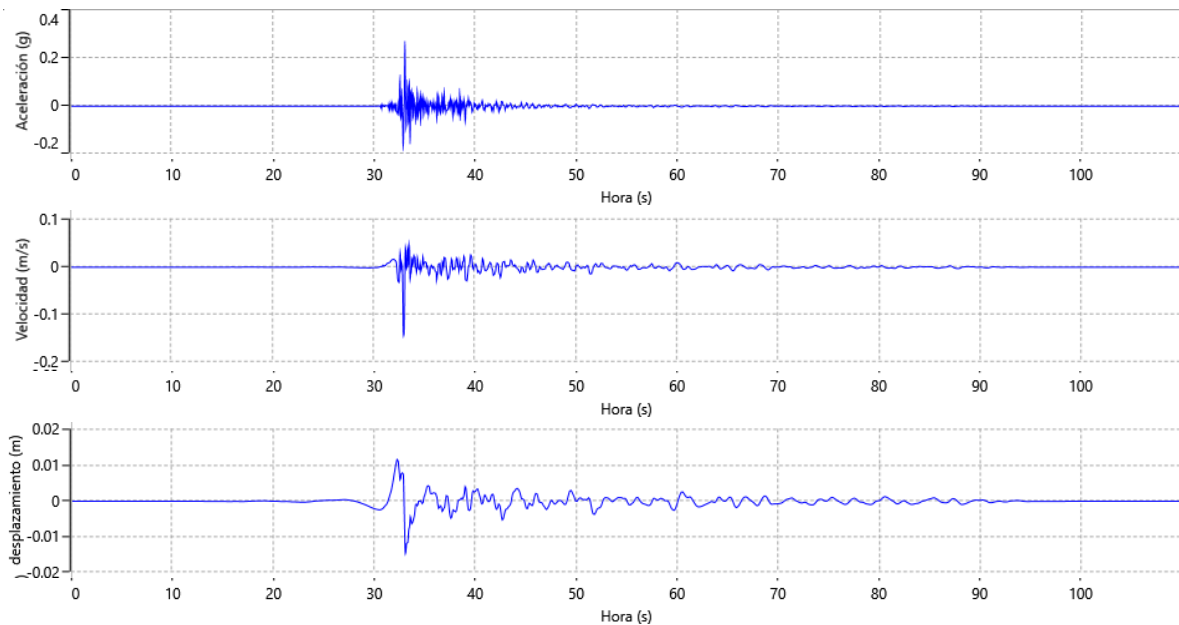
En las figuras 73 a la 79, se muestran los acelerogramas de los eventos sísmicos seleccionados, permitiendo así, realizar la determinación de las características de casa uno de los sismos, entre ellas los periodos predominantes de vibración, además en la Tabla 25 muestran las características de cada uno de los eventos sísmicos incluyendo la máxima aceleración.



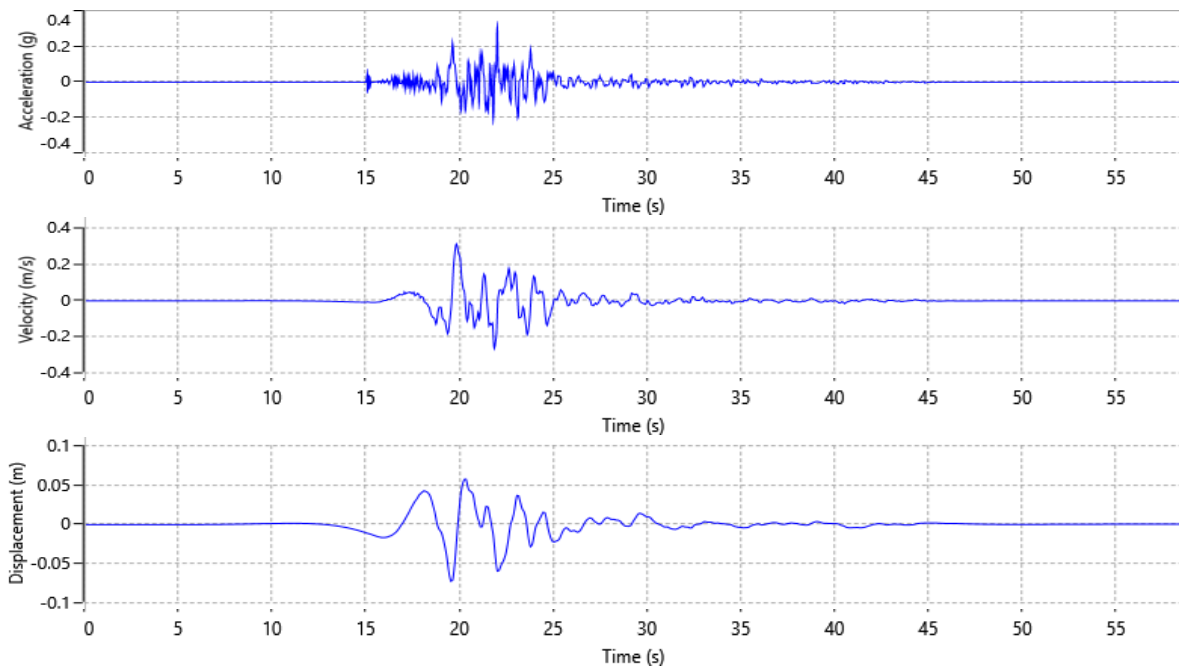
**Figura 73.** Sismo San Fernando ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente. **Fuente.** SeismoSignal V 4.3.



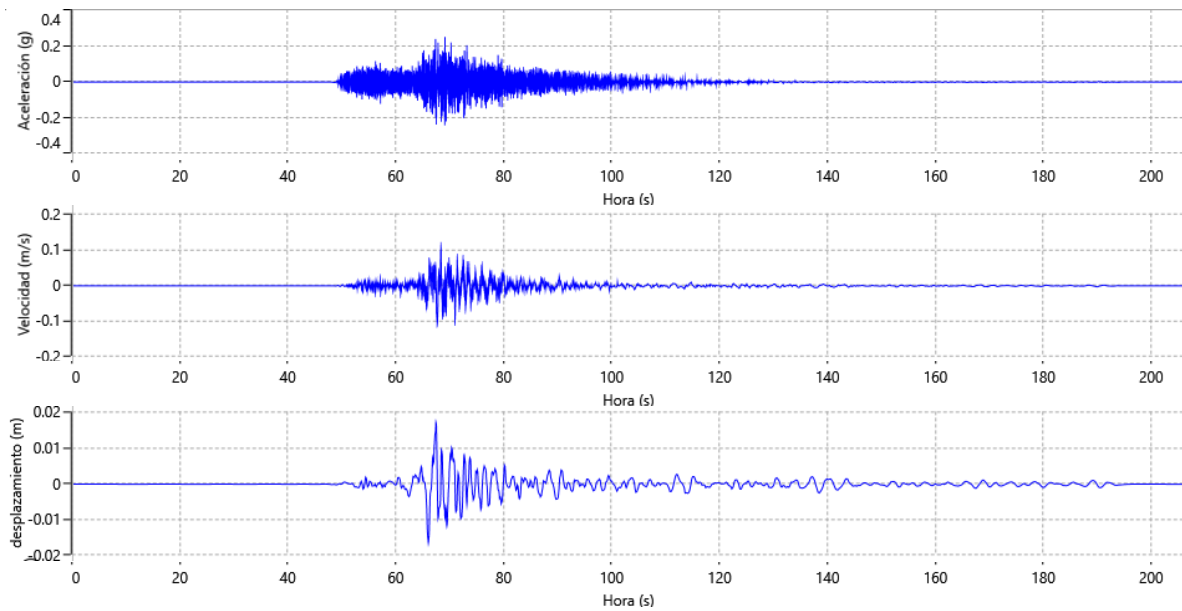
**Figura 74.** Sismo Iwate ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente. **Fuente.** SeismoSignal V 4.3.



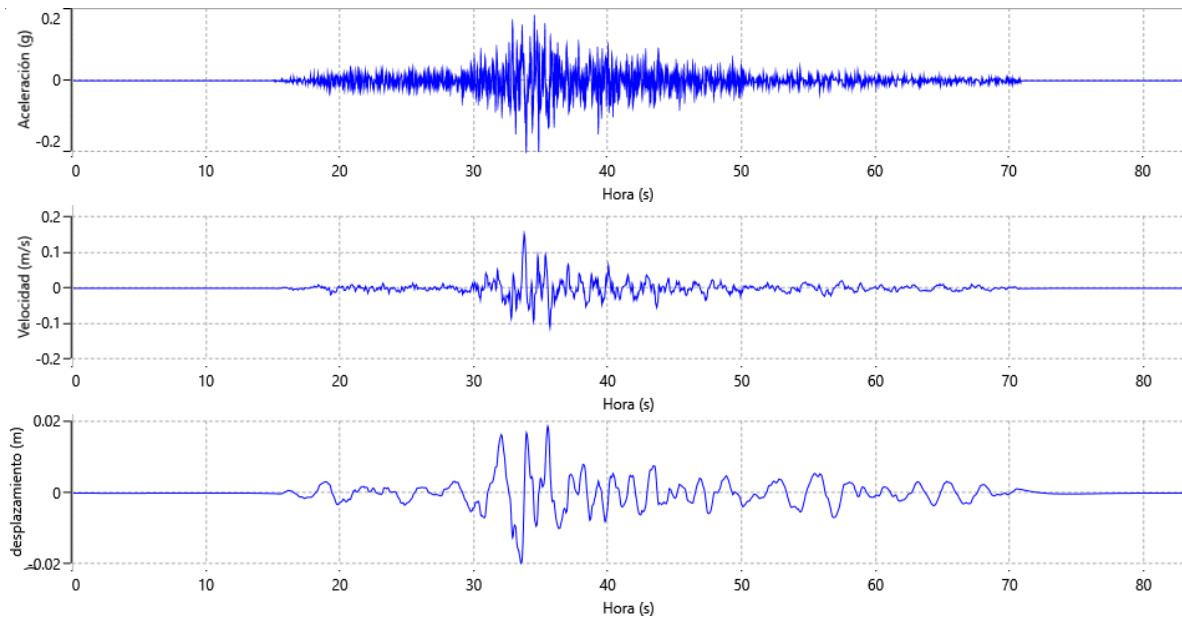
**Figura 75.** Sismo Parkfield ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente.  
**Fuente.** SeismoSignal V 4.3.



**Figura 76.** Sismo Kobe ambiente tectónico cortical; Acelerograma, Velocigrama y desplazigrama respectivamente.  
**Fuente.** SeismoSignal V 4.3.

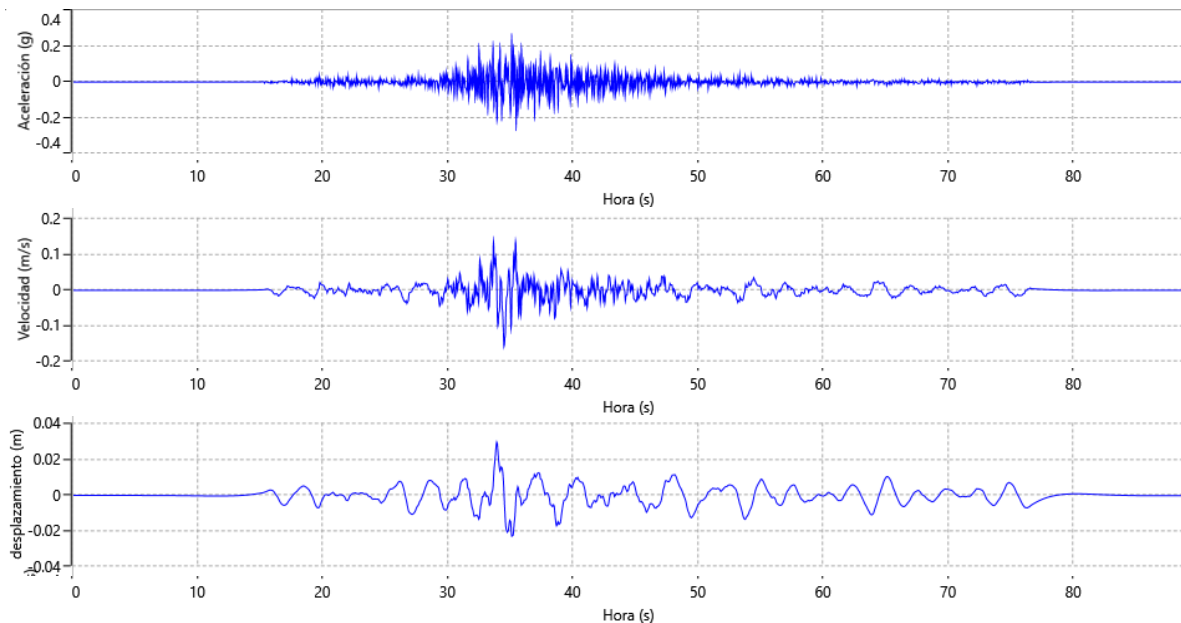


**Figura 77.** Sismo Tarapacá Estación TARA06R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y deslplacigrama respectivamente.  
**Fuente.** SeismoSignal V 4.3.



**Figura 78.** Sismo Tarapacá Estación TARA09R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y deslplacigrama respectivamente.  
**Fuente.** SeismoSignal V 4.3.





**Figura 79.** Sismo Tarapacá Estación TARA08R ambiente tectónico Intraplaca; Acelerograma, Velocigrama y deslplacigrama respectivamente.

**Fuente.** SeismoSignal V 4.3.

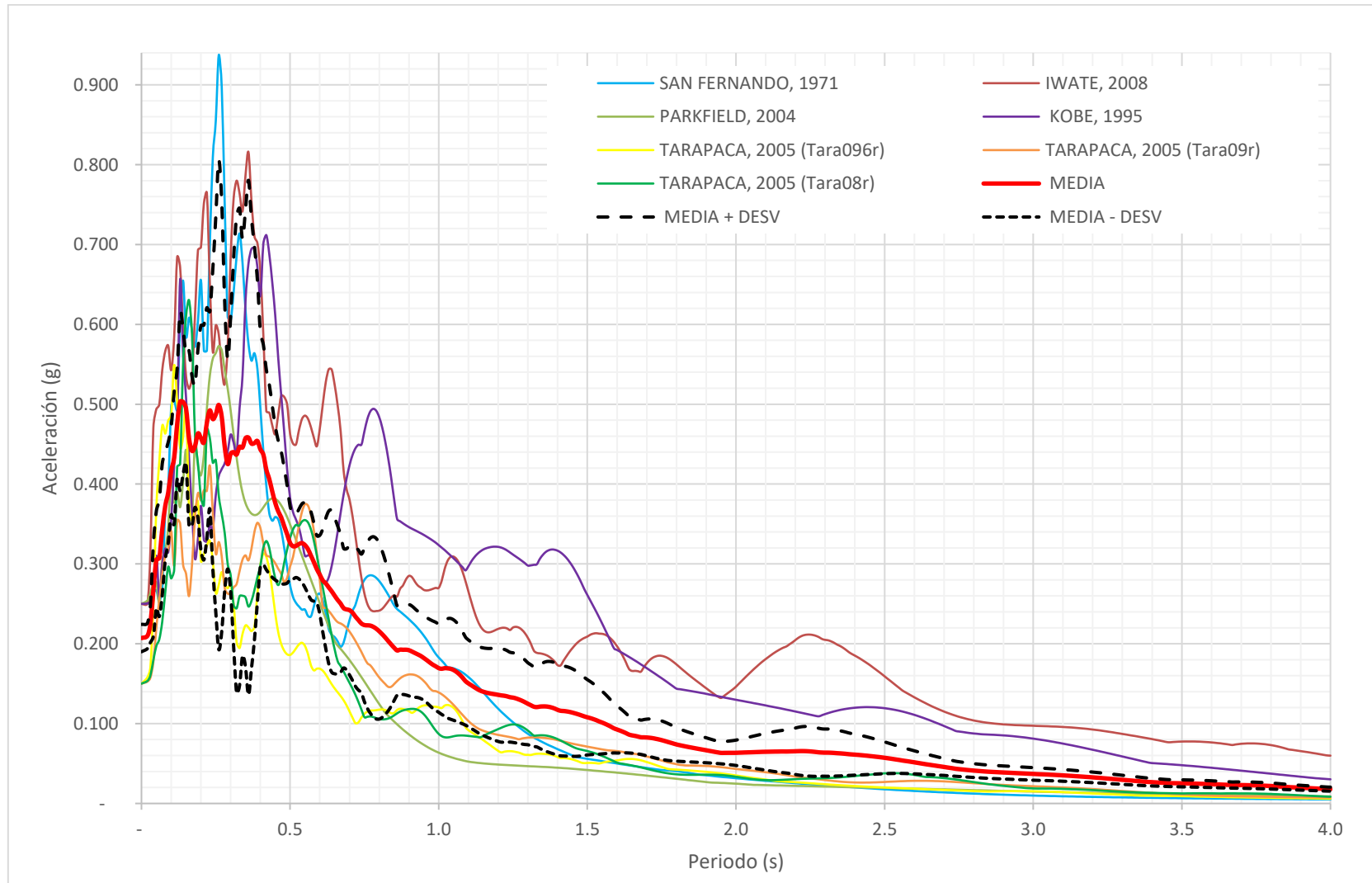
**Tabla 25.**

*Características de los acelerogramas seleccionados*

# Acelerograma		01	02	03	04	05	06	07
<b>Máxima aceleración</b>	<b>g</b>	0.205	0.226	0.245	0.312	0.312	0.196	0.242
<b>Máxima Velocidad</b>	<b>m/s</b>	0.129	0.218	0.146	0.314	0.311	0.153	0.160
<b>Máximo Desplazamiento</b>	<b>m</b>	0.013	0.076	0.015	0.073	0.085	0.020	0.030
<b>Vmax/Amx</b>	<b>s</b>	0.064	0.099	0.061	0.103	0.102	0.080	0.067
<b>Periodo predominante (Tp)</b>	<b>s</b>	0.260	0.360	0.260	0.420	0.420	0.220	0.160
<b>Periodo Promedio (Tm)</b>	<b>s</b>	0.317	0.515	0.352	0.687	0.679	0.341	0.289

*Fuente. Propio.*

En la Figura 80, se representan los espectros de aceleración de los distintos eventos sísmicos seleccionados relacionada para un periodo de retorno de 475 años a nivel de roca.



**Figura 80.** Espectros de pseudo-aceleración ( $S_a$ ) de los eventos sísmicos seleccionados  
**Fuente.** Propia con base en la información arrojada por el SeismoSignal V 4.3.

## Capítulo VI

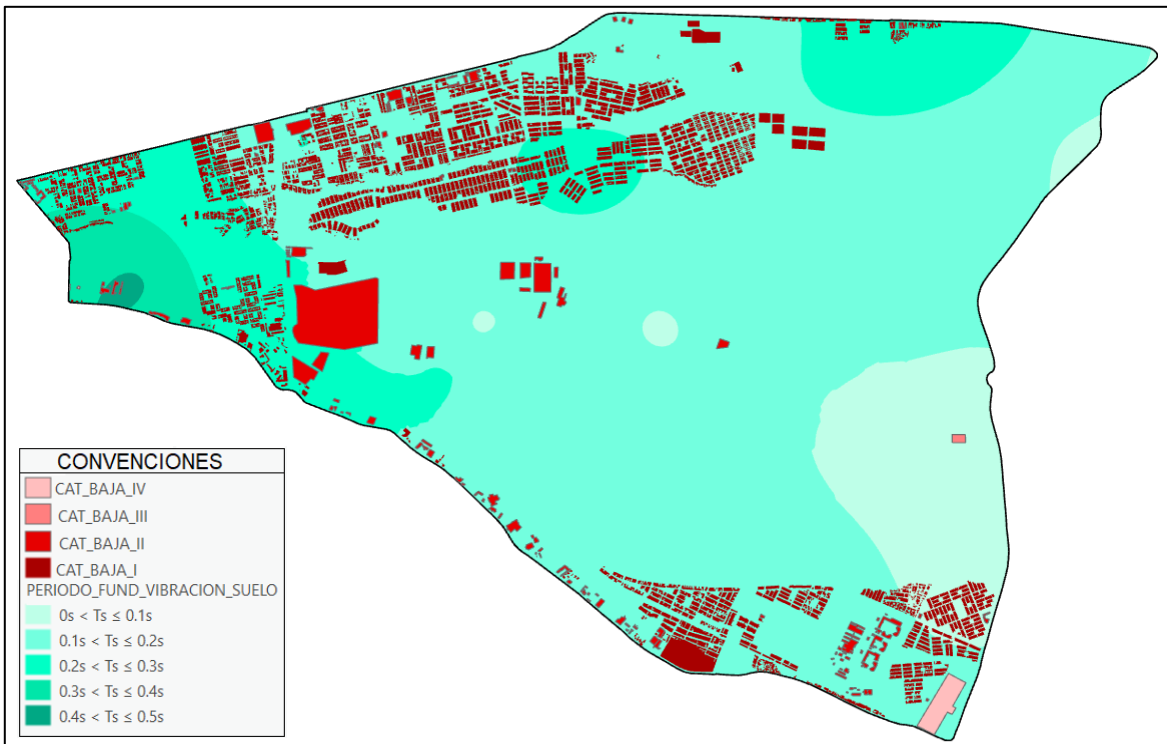
### Zonificación Sísmica

Para determinar la respuesta sísmica por interacción sismo suelo estructura es necesario identificar los lugares dentro del perímetro de trabajo que son susceptibles a generar resonancia, para este caso, se hizo uso inicialmente de la información obtenida de los capítulos anteriores, como son los periodos de vibración de cada una de las edificaciones y los periodos de vibración fundamentales de los suelos que subyacen la zona de estudio. Una vez tomada la información, se realizó la depuración e identificación de las zonas en las cuales existe probabilidad de coincidencia de periodos de vibración.

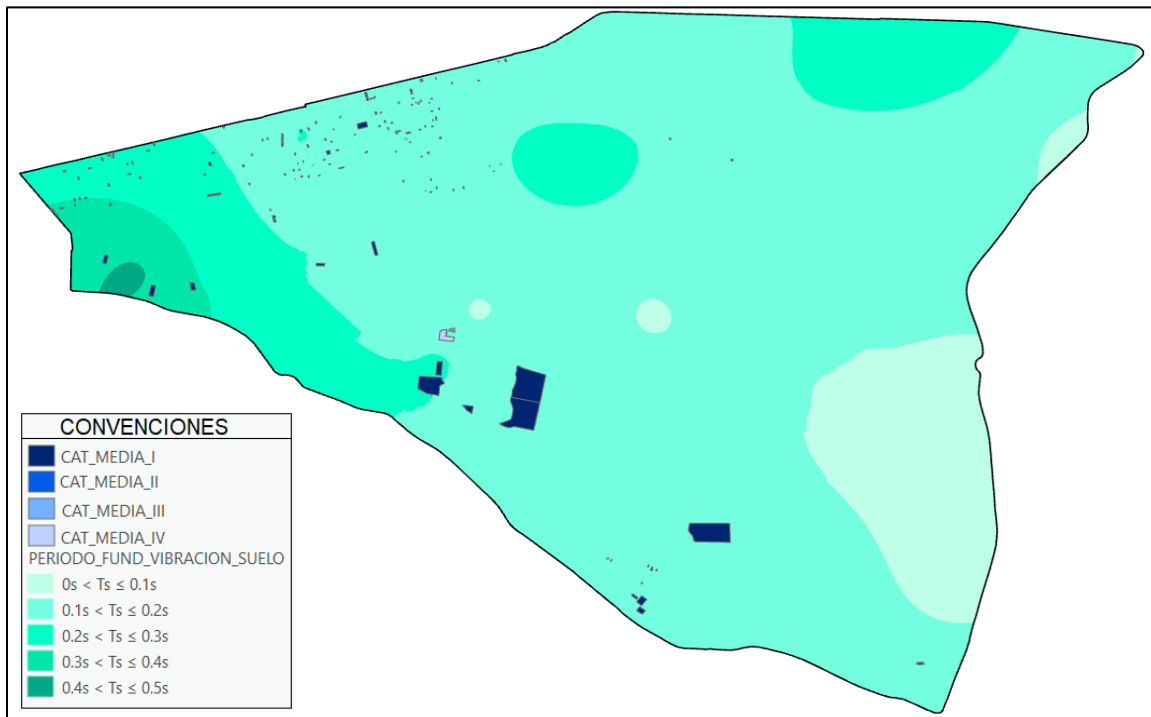
La periodos fundamentales de vibración de los suelos se encuentran entre 0.08 y 0.42s, lo que permite identificar que las estructuras con principal riesgo de afectación en la ciudad de Ibagué son las edificaciones de categoría baja y media, es decir, las estructuras de tipo 1.I, 1.II, 1.III, 1.IV y 2.1.

Las figuras 81 - 83, muestran la discretización del periodo fundamental de vibración del suelo superpuesto por las edificaciones detalladas en el Capítulo III, con el fin de identificar los lugares con posibilidad de generar fenómenos de resonancia. En la Figura 81, se evidencia que gran parte de las construcciones de categoría baja se ubican sobre perfiles de suelo con periodos de vibración de 0s a 0.3s, lo que las hace ser altamente susceptibles a producir resonancia al momento de producirse un sismo en un ambiente tectónico cortical.

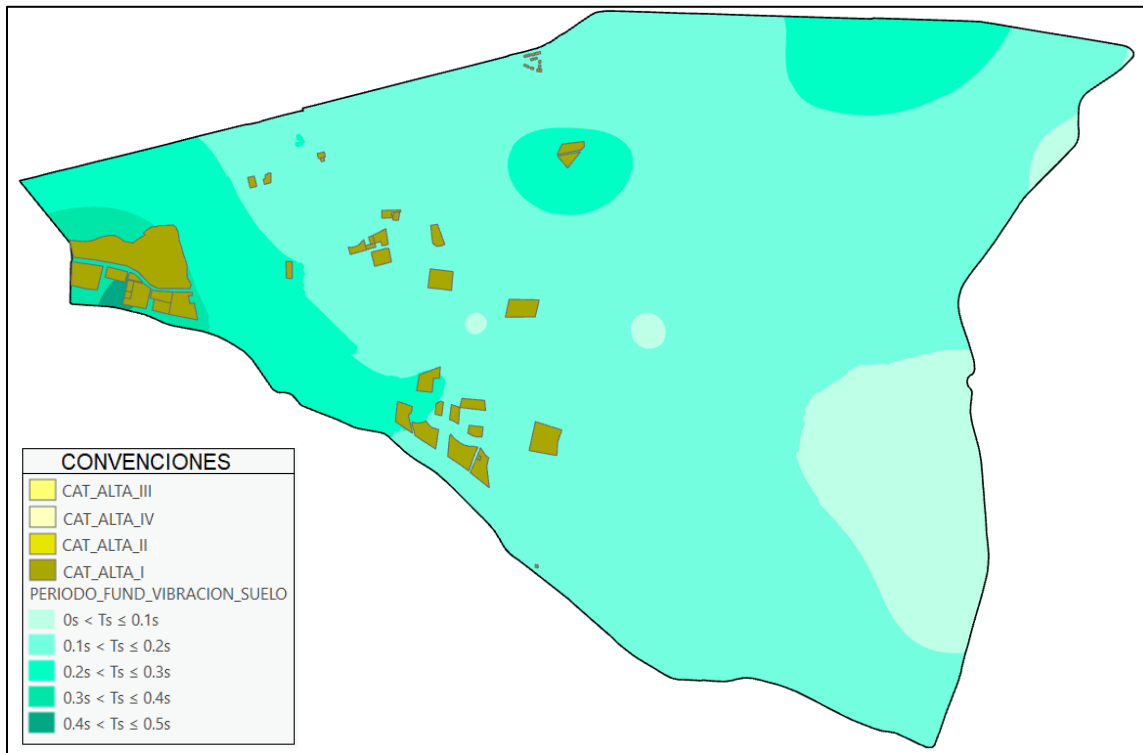
Por otro lado, los periodos de vibración de las edificaciones de categoría media van de 0.28s a 0.9s y están ubicadas sobre lugares donde los periodos naturales de vibración de los suelos son de hasta 0.42s, lo que indica la probabilidad de presentar similitud y coincidencia en el modo fundamental de vibración, tal y como se evidencia en la Figura 82. Las edificaciones de categoría alta presentan periodos fundamentales de vibración mayores a 0.56s, lo que indica que la probabilidad de generar fenómenos de resonancia es baja por su diferencia con relación al periodo natural de vibración de los suelos (Ver Figura 83)



**Figura 81.** Mapa de zonificación de suelo  $0s < T_s < 0.5s$  y estructuras de unidad de construcción Baja.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020



**Figura 82.** Mapa de zonificación de suelo  $0s < T_s < 0.5s$  y estructuras de unidad de construcción Media.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020



**Figura 83.** Mapa de zonificación de suelo  $0s < T_s < 0.5s$  y estructuras de unidad de construcción Alta.  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

Con la finalidad de complementar la zonificación de los periodos de vibración de los suelos y estructuras y teniendo en cuenta la topografía de la zona, se realizaron 4 perfiles sobre el área de estudio como se evidencia en la Figura 84. En cada uno de los perfiles, se ilustró la descripción geotécnica de cada estrato de suelo con base en la caracterización obtenida y la ubicación de cada una de las edificaciones existentes. Además, cada perfil contiene los valores correspondientes a los periodos naturales de vibración de los suelos, los periodos fundamentales de vibración de las estructuras, y los periodos predominantes de los registros sísmicos seleccionados.

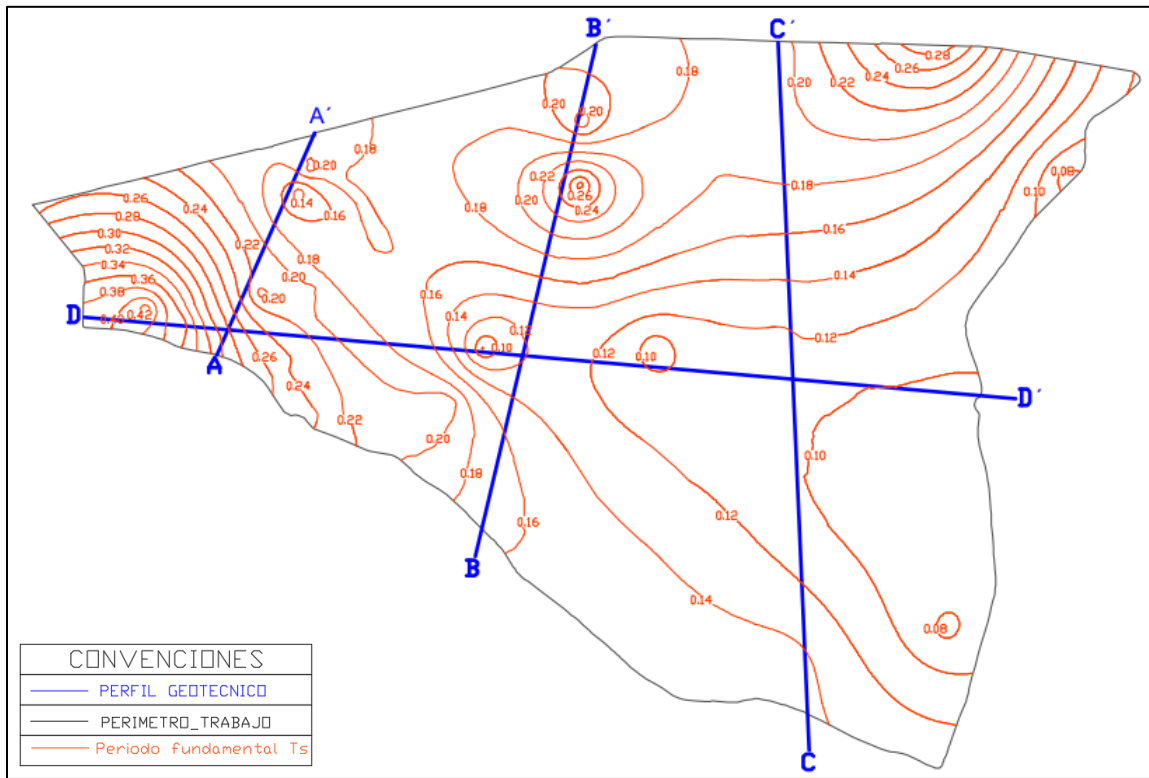
Los perfiles desarrollados fueron elaborados a través de las coordenadas establecidas en la Tabla 26.

**Tabla 26.**

*Coordenadas perfiles geotecnicos*

PERFILES	LONGITUD	LATITUD	LONGITUD	LATITUD	DISTANCIA (m)
<b>A-A'</b>	-75.1850114	4.4400737	-75.1910941	4.4261547	1690.98
<b>B-B'</b>	-75.1749267	4.4135522	-75.1673727	4.4456201	3642.42
<b>C-C'</b>	-75.1540221	4.4014252	-75.1559854	4.4457427	4926.23
<b>D-D'</b>	-75.1994254	4.4285664	-75.1410996	4.4234377	6495.39

**Fuente.** Propio.



**Figura 84.** Ubicación perfiles geotécnicos desarrollados sobre el área de trabajo  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro y Autodesk AutoCAD, 2020.

La Figura 85 y anexo 4-1 corresponde al perfil A-A' de 1691m de longitud, en él se ubican las estructuras existentes, la clasificación de cada estrato de suelo y la profundidad estimada del Basamento Rocoso (Batolito de Ibagué), de acuerdo con lo establecido en el Mapa Geológico de Colombia 2019, elaborado por el Servicio Geológico Colombiano y la cartografía Geología – Geotécnica y aptitud urbanística de la ciudad de Ibagué desarrollada por la Sociedad Tolimense de Ingenieros en el año 2012.

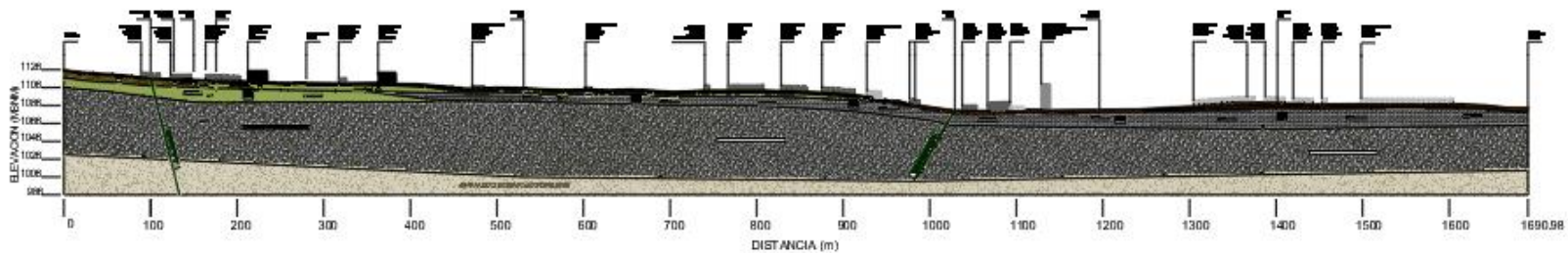
Las profundidades máximas de exploración han arrojado perfiles de suelos de hasta 25m, por lo que teniendo en cuenta las características y propiedades geotécnicas, después de las profundidades de rechazo o desde una velocidad de onda de corte mayor o igual a 760m/s se asignó un suelo de Gravas, piedras y grandes bloques en matriz arcillosa y arenosa de color café con densidad muy compacta.

En el inciso (b), se evidencia la asignación del periodo de vibración del suelo a lo largo de toda la distancia del perfil, y posteriormente se asignó el periodo fundamental de vibración aproximado de las edificaciones y el periodo fundamental de vibración máximo permitido de las edificaciones de acuerdo con los incisos A.4.2.2. y A.4.2.1, respectivamente, del Título A del Reglamento Colombiano de Sismoresistencia NSR-10. Lo

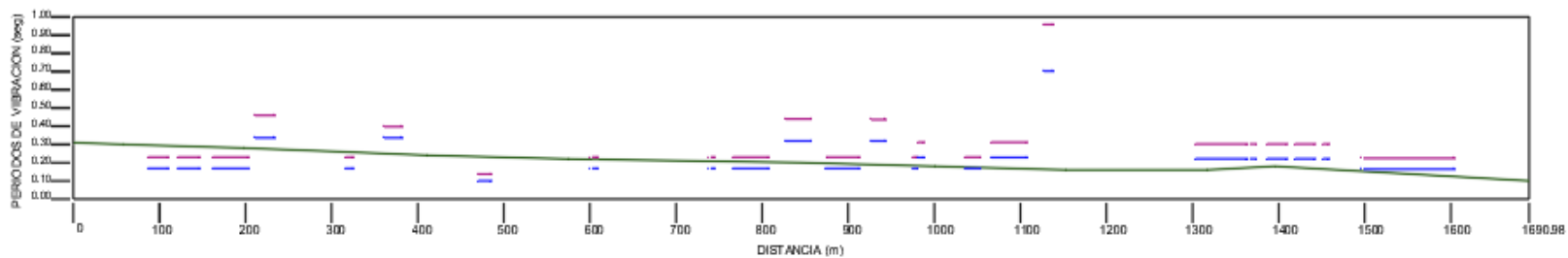
anterior se llevó a cabo con la finalidad de identificar los lugares sobre los cuales existe posibilidad de generar resonancia sísmica por interacción sísmica suelo estructura.

Como parámetro de referencia se asume que existe probabilidad de resonancia si el periodo de vibración del suelo se acerca en mínimo un  $\pm 10\%$  con relación al periodo fundamental de vibración de la edificación. Considerando que el periodo predominante del sismo es similar al del suelo, la probabilidad de amplificación de las ondas sísmica es mayor e incrementa la vulnerabilidad de las edificaciones y población que habita la zona.

El perfil A-A', muestra distintas zonas en los cuales los periodos de vibración de los suelos y las edificaciones existentes coinciden o se encuentran en un rango cercano. Sobre la Figura 86 se ubica la Urbanización Ciudad Luz donde existen edificaciones en mampostería confinada de 2 niveles con periodos de vibración entre 0.16s y 0.23s. Además subyacen depósitos de suelo con periodos de vibración de 0.18s a 0.21s. Lo anterior, hace que exista una probabilidad de generar fenómenos de resonancia por interacción sísmica suelo estructura (ISSE), frente a eventos sísmicos con periodos predominantes de vibración cercanos a los periodos de vibración de los suelos y estructuras.



(a)



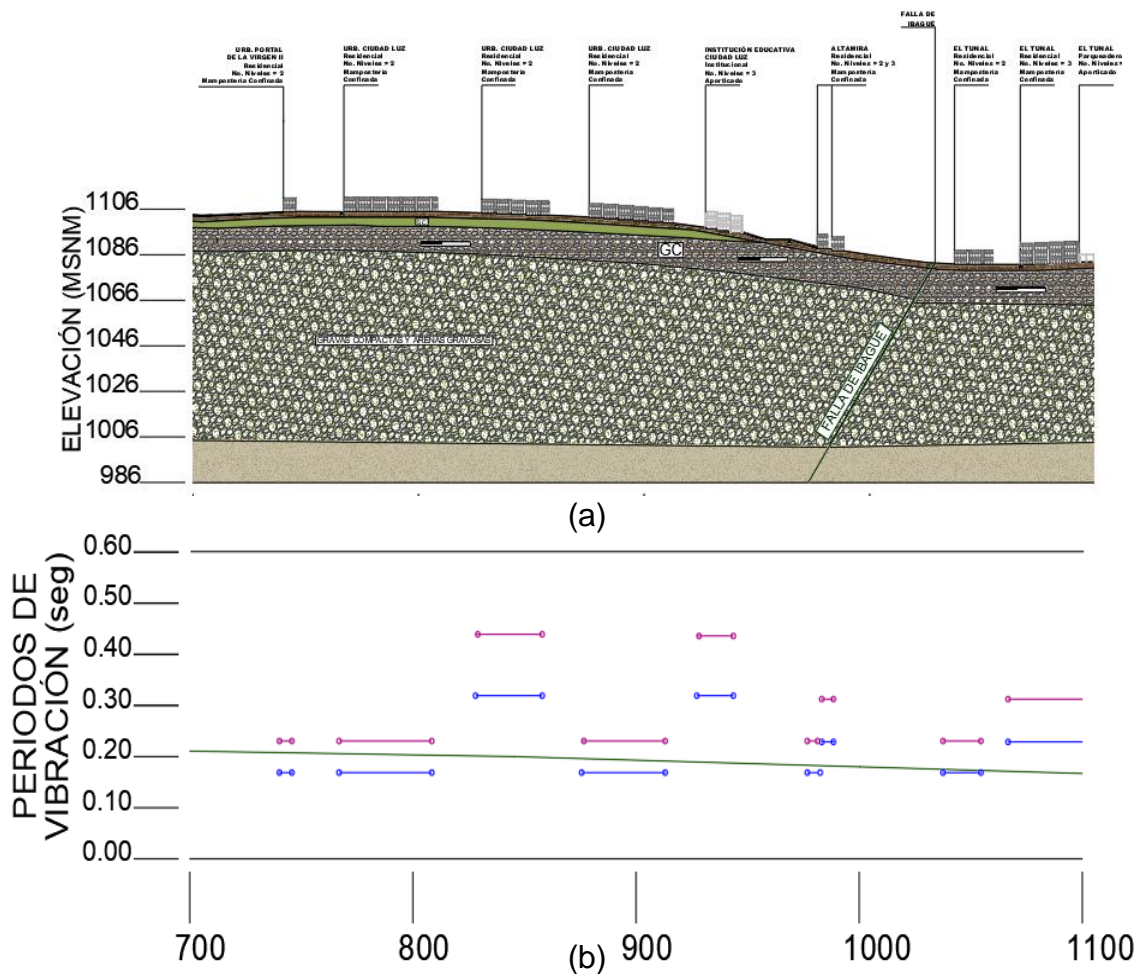
(b)

CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR- 10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR- 10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS (INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

CONVENCIONES		
CONVENCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	CL	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD
	CH	ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD
	SC	ARENA ARCILLOSA
	GC	GRAVA ARCILLOSA
		BATOLITO DE IBAGUÉ
	ML	LIMO DE BAJA PLASTICIDAD
	MH	LIMO DE ALTA PLASTICIDAD
	SM	ARENA LIMOSA
	GM	GRAVA LIMOSA
		GRAVAS COMPACTAS Y ARENAS GRAVOSAS

**Figura 85.** Perfiles A-A' contiene (a) perfil geotécnico y estructural (b) perfil longitud- periodo fundamental de vibración  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.

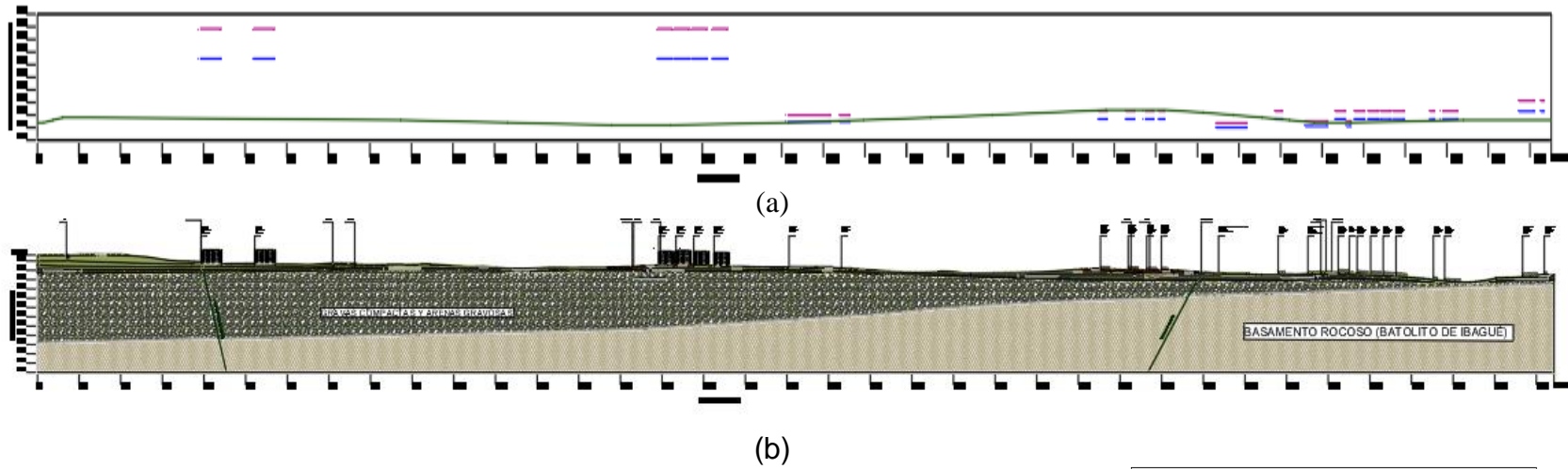




CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR-10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIONES DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR-10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS (INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

**Figura 86.** Urb. Ciudad Luz contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural  
**Fuente.** Fracción del Perfil A-A', Figura 84.

En el perfil B-B' representado en la Figura 87 y a mayor detalle en el anexo 4-2, se evidencia que a lo largo que su longitud, existen edificaciones con periodos de vibración muy superiores al periodo de vibración del depósito, lo que hace de estas estructuras más seguras y la probabilidad de generarse una interacción sísmica, suelo y estructura que afecte negativamente, es menor.

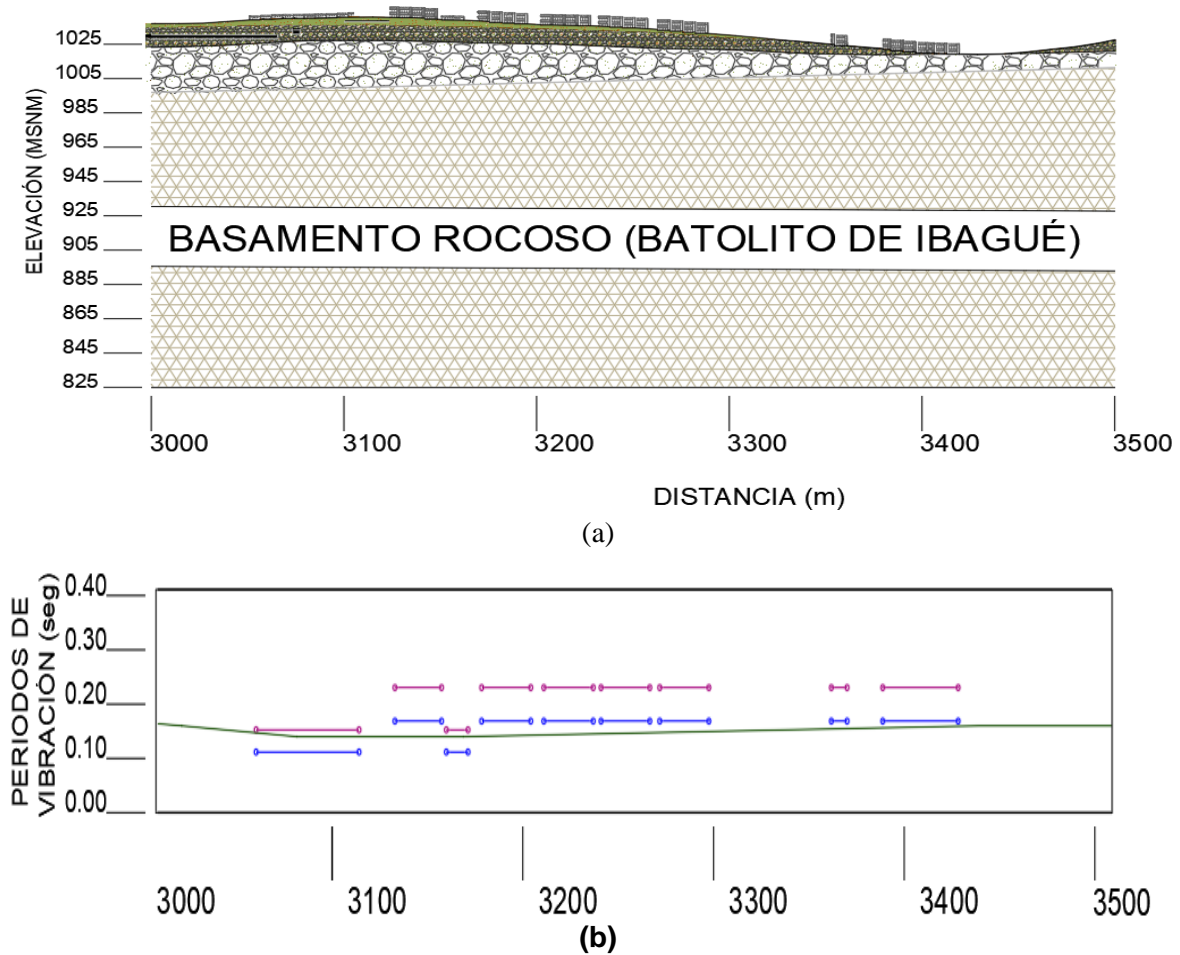


CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR- 10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR- 10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS ( INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

CONVENCIONES		
CONVENCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	CL	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD
	CH	ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD
	SC	ARENA ARCILLOSA
	GC	GRAVA ARCILLOSA
		BATOLITO DE IBAGUÉ
	ML	LIMO DE BAJA PLASTICIDAD
	MH	LIMO DE ALTA PLASTICIDAD
	SM	ARENA LIMOSA
	GM	GRAVA LIMOSA
		GRAVAS COMPACTAS Y ARENAS GRAVOSAS

**Figura 87.** Perfiles B-B' contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.

En la zona más baja del perfil (ver Figura 88), existe barrios como Urb. Nuevo Combeima y Topacio los cuales se constituyen de edificaciones de estrato 1, 2 y 3 de hasta 2 niveles en mampostería Confinada, y con periodos fundamentales de vibración de 0.11s a 0.23s, y sobre estas subyacen suelos con periodos de vibración de 0.23s en la Urb. Nuevo Combeima y de 0.14s a 0.16s en el barrio Topacio. Lo anterior, demuestra la probabilidad sobre estos sectores de generación de resonancia por interacción sísmica suelo estructura, frente a eventos sísmicos con periodos predominantes de vibración pequeños.



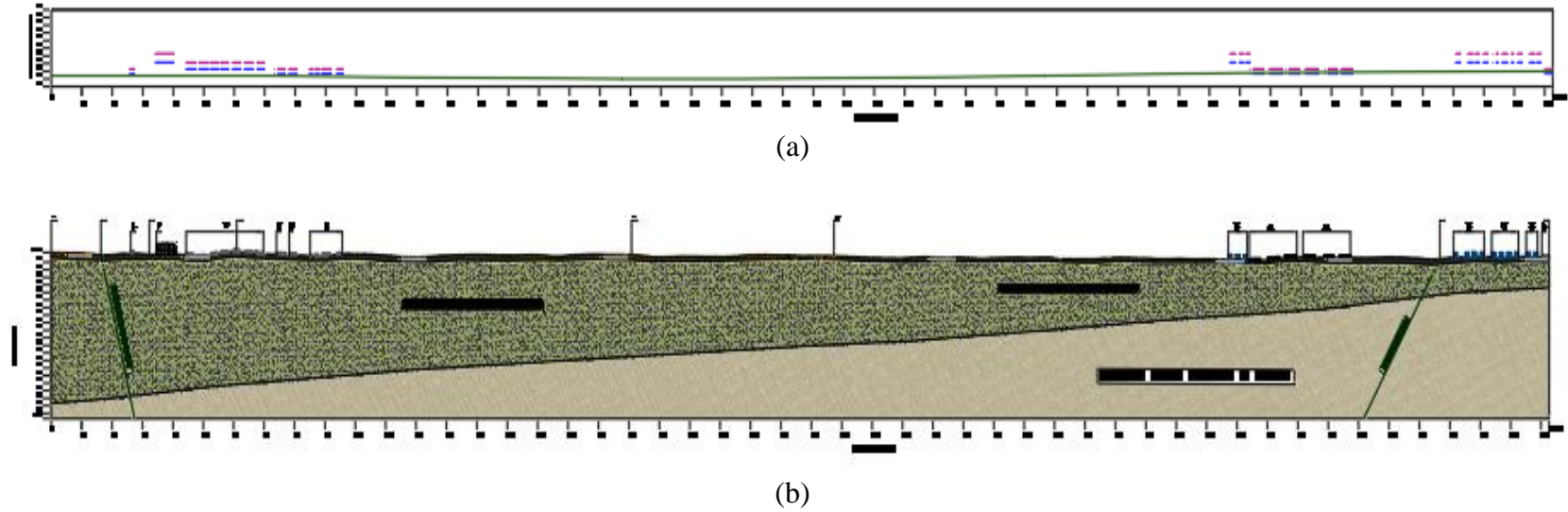
CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR-10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIONES DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR-10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS (INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

Figura 88. Barrio Topacio contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural Fuente. Fracción del Perfil B-B', Figura 86.

Los perfiles C-C' y D-D', se pueden visualizar en las imágenes 89, 90 y para mayor claridad de la información contenida en los anexos 4-3 y 4-4

Sobre la longitud de los perfiles C-C' y D-D', los barrios Urb. Comfenalco, Ciudad Alminar, Salado y Urb. Villa Café, arrojan periodos fundamentales de vibración similares a los periodos de vibración de los depósitos, para este caso, las edificaciones son principalmente en mampostería confinada y muros estructurales en concreto de hasta 2 niveles con periodos de vibración de 0.16s a 0.23s, así mismo subyacidas por depósitos de suelo con periodos de vibración de 0.13s a 0.18s, tal y como se evidencia en la Figura 91.

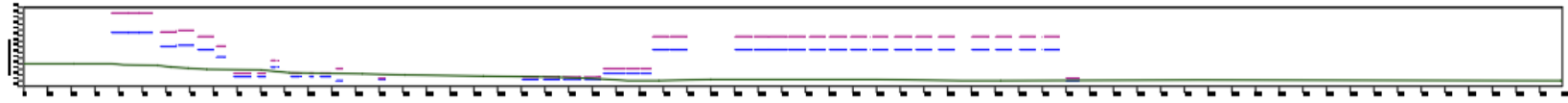
En algunos sectores del perfil C-C', específicamente sobre el área del barrio Ciudad Torreón, se encuentran en construcción, edificaciones de hasta 5 niveles en mampostería Estructural con periodos fundamentales de vibración de 0.33s a 0.45s, que es subyacido por un depósito del suelo que tiene periodos de vibración de hasta 0.2s, en este orden, los periodos de vibración tienen una diferencia que harían de la estructura menos susceptible a ISSE, sin embargo, los microtremores 16 y 18, que se llevaron a cabo en cercanías con la zona arrojaron periodo de vibración de 0.46s y 0.54s, respectivamente, que por la gran diferencia en sus valores con respecto a los demás ensayos fueron tomados como valores errados, permite tener un grado de incertidumbre frente a la variación del periodo de vibración del suelo, y la coincidencia o cercanía en mínimo un 10% con respecto al periodo fundamental de vibración de las edificaciones.



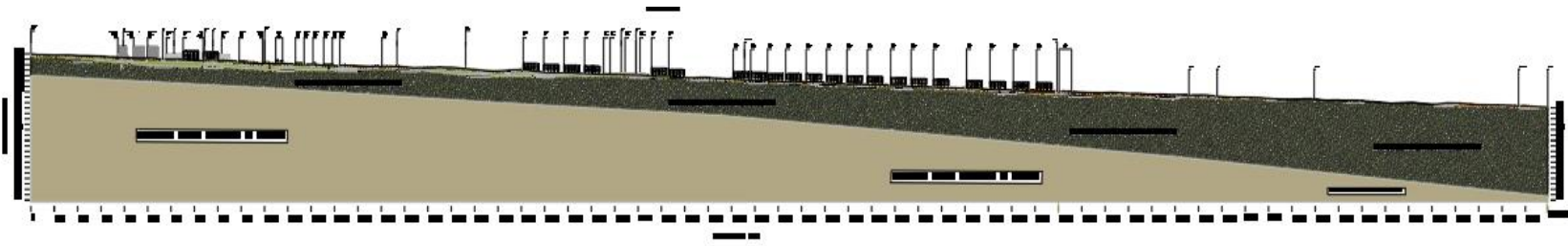
CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR- 10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR- 10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS ( INCISO A 2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

CONVENCIONES		
CONVENCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	CL	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD
	CH	ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD
	SC	ARENA ARCILLOSA
	GC	GRAVA ARCILLOSA
		BATOLITO DE IBAGUÉ
	ML	LIMO DE BAJA PLASTICIDAD
	MH	LIMO DE ALTA PLASTICIDAD
	SM	ARENA LIMOSA
	GM	GRAVA LIMOSA
		GRAVAS COMPACTAS Y ARENAS GRAVOSAS

**Figura 89.** Perfiles C-C' contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.



(a)

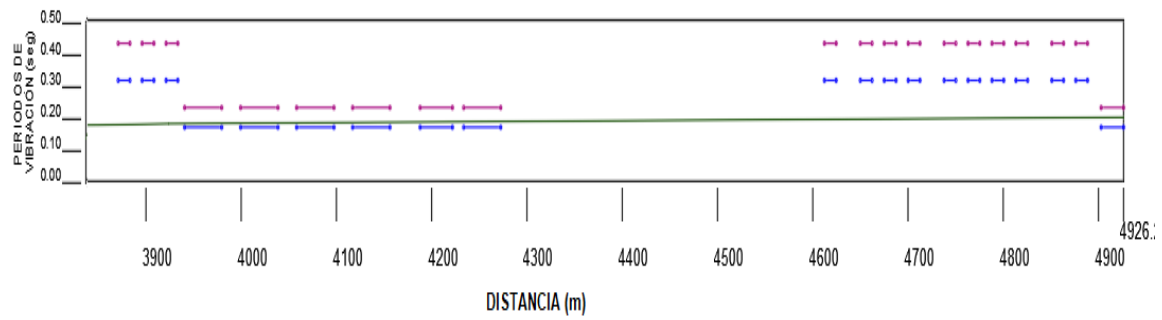


(b)

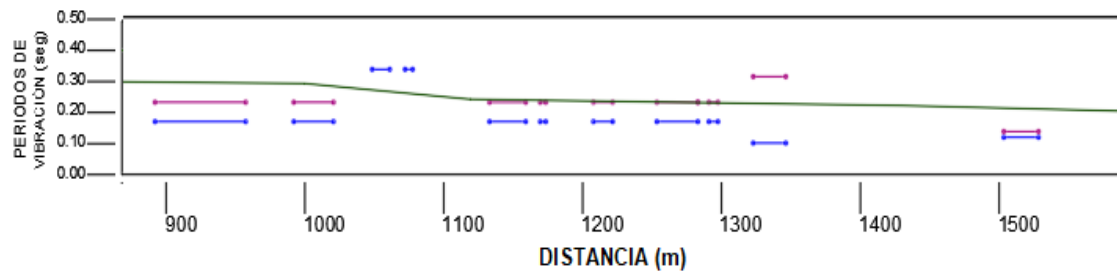
CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR- 10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIÓN DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR- 10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS (INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

CONVENCIONES		
CONVENCIÓN	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	CL	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD
	CH	ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD
	SC	ARENA ARCILLOSA
	GC	GRAVA ARCILLOSA
		BATOLITO DE IBAGUÉ
	ML	LIMO DE BAJA PLASTICIDAD
	MH	LIMO DE ALTA PLASTICIDAD
	SM	ARENA LIMOSA
	GM	GRAVA LIMOSA
		GRAVAS COMPACTAS Y ARENAS GRAVOSAS

**Figura 90.** Perfiles D-D' contiene (a) perfil longitud- periodo fundamental de vibración (b) perfil geotécnico y estructural  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.



(a)



(b)

CONVENCIONES	
	FALLAS GEOLÓGICAS
	PERIODO DE VIBRACIÓN DEL SUELO
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN APROXIMADO DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.2, TITULO A - NSR-10)
	PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN MÁXIMO PERMITIDO DE LAS EDIFICACIONES DE LAS EDIFICACIONES (INCISO A.4.2.1, TITULO A - NSR-10)
	VELOCIDAD MEDIA DE LA ONDA DE CORTE SOBRE LOS PRIMEROS 30m DEL SUELOS ( INCISO A.2.4.3.1, TITULO A - NSR-10)

**Figura 91.** (a) Perfiles longitud- periodo fundamental de vibración C-C´ (Barrios Ciudad almar, Ciudad Torreón y salado)  
 (b) Perfiles longitud- periodo fundamental de vibración D-D´ (Urb. Villa Café)  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición

Con la definición detallada de cada uno de los cuatro perfiles, se identificaron los sectores dentro del perímetro de estudio que presentan susceptibilidad a generarse resonancia por interacción sísmica, suelo-estructura, estos son reflejados en la Tabla 27.

**Tabla 27.***Sectores con probabilidad de resonancia sísmica por ISSE*

<b>PUNTO</b>	<b>BARRIO Y/O URBANIZACION</b>	<b>T (s)</b>	<b>Ta (s)</b>	<b>Ts (s)</b>
1	Colegio Champagnat	0.168	0.230	0.22
2	Urb. Portal de la Virgen	0.168	0.230	0.22
3	Urb. Ciudad luz	0.168	0.230	0.22
4	Altamira	0.168	0.230	0.20
5	El Tunal	0.168	0.230	0.18
6	Almacén Homecenter	0.163	0.223	0.18
7	Urb. Villa Café	0.168	0.230	0.24
8	Urb. Nuevo Combeima	0.168	0.230	0.24
9	Topacio	0.168	0.230	0.18
10	U.S.I Topacio	0.116	0.152	0.16
11	Picaleña	0.168	0.230	0.14
12	Urb. Comfenalco	0.168	0.230	0.14
13	Ciudad Alminar	0.168	0.230	0.18
14	Salado	0.168	0.230	0.18

**Fuente.** Propia.



## Capítulo VII

### Análisis de Respuesta Sísmica

Para el desarrollo de la metodología de análisis de respuesta sísmica en un lugar determinado, es necesario identificar las características físicas y dinámicas de cada uno de los estratos que permitan obtener resultados confiables, de no ser posible la confiabilidad del perfil geotécnico se debe realizar la calibración de los modelos por medio de la iteración de las propiedades mecánicas y dinámicas de los estratos de suelos del perfil en estudio y comparar su resultado frente a la señal sísmica en superficie en campo libre registrada.

Como fue indicado en el numeral 5.4. Selección y procesamiento de eventos sísmicos, sobre la ciudad de Ibagué se existen 4 estaciones de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), ubicadas tal y como se indica en la Tabla 28. La estación CIBA3, se encuentra dentro de la zona de estudio sobre suelo, lo que obtendrá señales en superficie, por otro lado, la estación CIBA4, se encuentra en roca; con estas dos estaciones, por su cercanía se lograría obtener señales tanto en roca como en superficie que permitirían la calibración de los perfiles geotécnicos, sin embargo, los efectos de sitio por la topografía que existe desde la roca de la estación Vereda Cay (CIBA4), a la estación Champagnat (CIBA3), produce cambios importantes en el contenido frecuencial de la señal que no permitirían calibraciones con la calidad necesaria y que representen el comportamiento de la señal desde la roca hasta la superficie en el punto detallado.

Por tal motivo las modelaciones de respuesta sísmica de los sitios de análisis se desarrollaron haciendo uso de las características mecánicas y dinámicas de los diferentes estratos de suelo, tal y como fue desarrollado en la caracterización geotecnia de la zona.

**Tabla 28.**

*Estaciones sobre la ciudad de Ibagué de la Red Nacional de Acelerogramas*

<b>Id</b>	<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Geología</b>	<b>Topografía</b>
<b>CIBA1</b>	Ibagué, SGC	4.447	-75.235	1.284	Suelo	Ondulada
<b>CIBA3</b>	Ibagué Champagnat	4.4319	-75.188	1.110	Suelo	Plana
<b>CIBA4</b>	Ibagué, Vereda Cay	4.44753	-75.2528	1.240	Roca	Plana
<b>CUIBA</b>	Universidad De Ibagué, Tolima	4.4499	-75.2002	1.104	Suelo	Ondulada

**Fuente.** Datos abiertos, ministerios de Minas y Energía, <https://www.datos.gov.co/Minas-y-Energ-a/Estaciones-Red-Nacional-de-Aceler-grafos/ss86-47c7>, 2020.

Con la finalidad de verificar la respuesta dinámica del suelo en superficie frente a la excitación sísmica en roca, se realizó la modelación por medio de un análisis lineal equivalente 1D, haciendo uso del software DEEPSOIL V 7.0 (Y. Hashash, et al; 2021), asumiendo la uniformidad infinita de las características del suelo en dirección horizontal, la capa correspondiente al basamento rocoso como un medio semi infinito y a profundidades donde se obtengan velocidades de onda de corte mayores a 760m/s y además las propiedades de cada estrato (peso específico, espesor, límites de plasticidad, módulo de corte, amortiguamiento, entre otras), asumiendo un comportamiento isotrópico y homogéneas en todo su espesor.

De acuerdo con lo indicado por Kramer (1995), los modelos lineales equivalentes asumen que las deformaciones cortantes son función de la relación de amortiguamiento y del módulo de corte determinados de manera iterativas mediante los siguientes pasos:

- Los módulos de rigidez inicial ( $G_{max}$ ) y el amortiguamiento ( $\lambda\%$ ) se miden a pequeñas deformaciones (inferiores a 0.0001).
- Se obtienen las máximas deformaciones cortantes ( $\gamma_{max}$ ) de cada uno de los estratos de acuerdo con la respuesta del suelo, y posteriormente se determina la deformación cortante efectiva ( $\gamma'_{eff}$ ), mediante la multiplicación de la relación de deformación cortante efectiva ( $R'\gamma$ ) y la deformación máxima ( $\gamma_{max}$ ).
- Por último se realiza el cálculo de los nuevos valores para el módulo de rigidez y amortiguamiento de cada estrato de suelos con respecto a la deformación cortante efectiva y se hace uno de una siguiente iteración.

Teniendo en cuenta lo anterior, los sitios objeto de modelación para el análisis de respuesta sísmica son los detallados en la Tabla 29 y ubicados en la Figura 92, además se realizó la ubicación de los sitios analizados en la Microzonificación Sísmica para la ciudad de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2006, específicamente los puntos ubicados en el polideportivo topacio y colegio Champagnat y además los puntos P3, P0, P5, P6 Y P7 analizados en la Microzonificación Sísmica en el municipio de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2020 (Tabla 30).

**Tabla 29.**

*Sitios de análisis de respuesta sísmica*

SITIO	UBICACION	
SA_1	75.1694987°W	4.436595°N
SA_2	75.1902096°W	4.428178°N

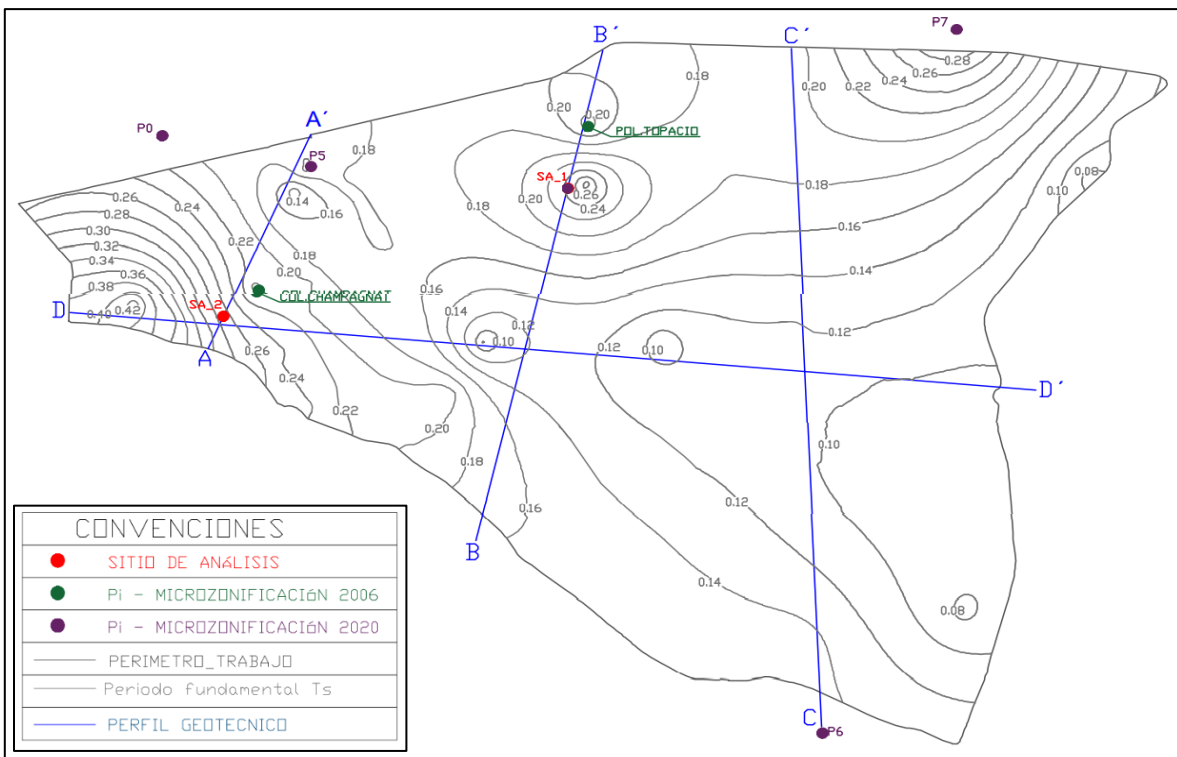
Fuente. Propia.

**Tabla 30.**

*Sitios de análisis de respuesta sísmica - Microzonificaciones sísmicas de Ibagué*

SITIO	UBICACION	AÑO
<b>Pol. Topacio</b>	75.168°W 4.440°N	2006
<b>Col. Champagnat</b>	75.188°W 4.429°N	
<b>P0</b>	75.193°W 4.440°N	2020
<b>P5</b>	75.185°W 4.437°N	
<b>P6</b>	75.153°W 4.401°N	
<b>P7</b>	75.146°W 4.446°N	

Fuente. Propia.



**Figura 92.** Ubicación sitios de análisis de respuesta Sísmica  
Fuente. Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS, 2020.

## 7.1. Sitio de análisis 1

El perfil estratigráfico de la Figura 93, muestra una profundidad de estratos de 21.5m, ubicado en la Urb. Nuevo Combeima, constituido por un estrato de 2,8m de arcilla gris oscura de consistencia muy dura, seguido de 4m de arenas limo arcillosas de color café con gravas que son subyacidas por 14.7m de gravas en matriz arcillosa y arenosa de color café, de densidad muy compacta (ver Tabla 31); por otro lado, sobre el lugar predominan construcciones en mampostería confinada y aporticadas de 1 a 3 niveles.

**Tabla 31.***Perfil geotécnico sitio de análisis 1*

ESCENARIO 1 – PERFIL DETERMINISTA								
CAPA	Estrato (m)		Espesor m	Tipo de Suelo	IP %	Pasa 200 (%)	Peso Unitario <i>kN/m<sup>3</sup></i>	Vs m/s
	De	Hasta		S.U.C. S				
1	0	1.8	1.8	CL	17.72	74.8	17.26	252
2	1.8	2.8	1	CL	15.24	78.6	17.26	284
3	2.8	4.7	1.9	SM	6.46	37.5	18.64	230
4	4.7	6.8	2.1	SM	21.5	42.5	18.64	188
5	6.8	9.1	2.3	SC	18.25		19.62	310
6	9.1	12	2.9	SC	13	45.6	19.62	388
7	12	21.5	9.5	SC	13		19.62	416
<b>PROMEDIO</b>							18.66	295.42
<b>DESVIACIÓN</b>							1.053	82.82

Fuente. Propia.

**URB. NUEVO COMBEIMA**

Uso Predominante

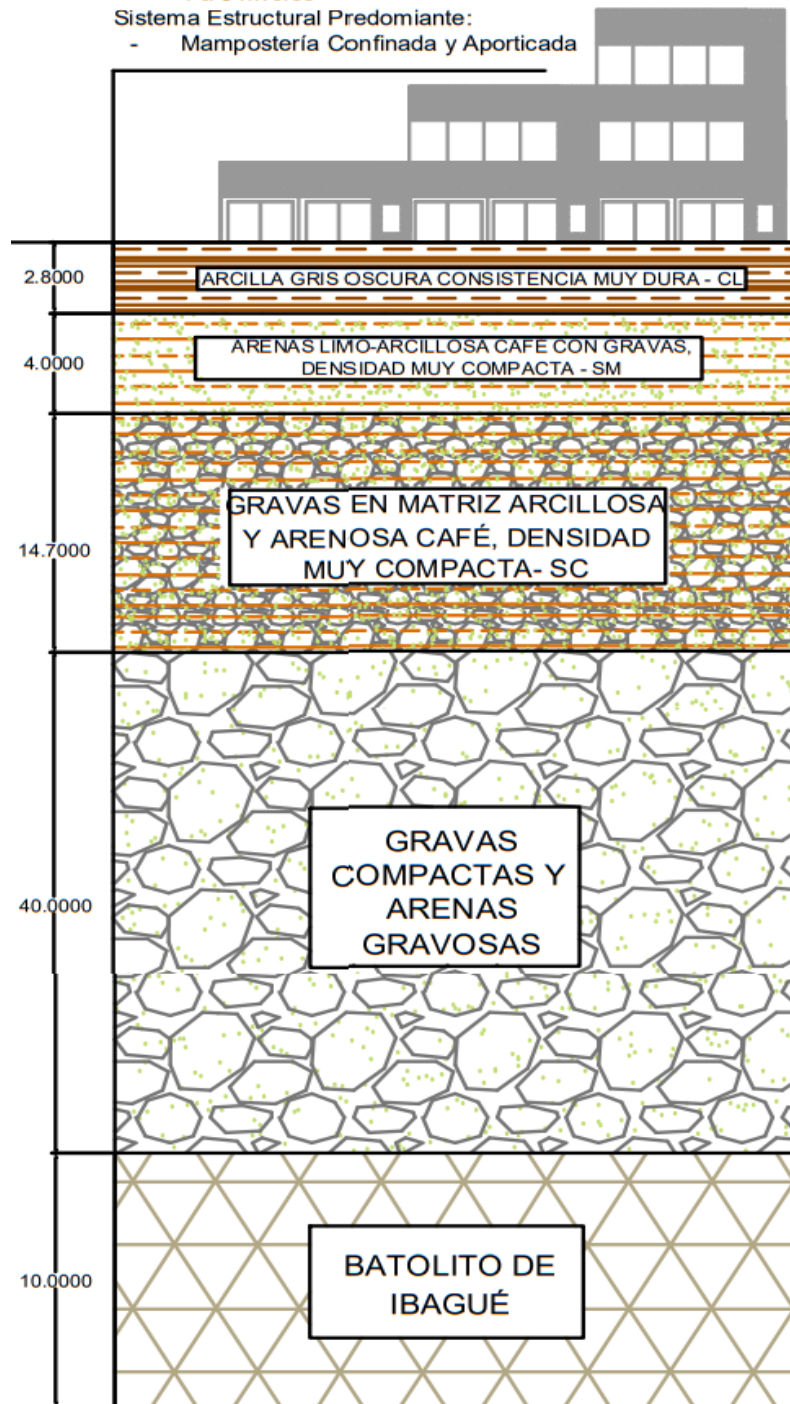
- Residencial

No. Niveles

- 1 a 3 niveles

Sistema Estructural Predominante:

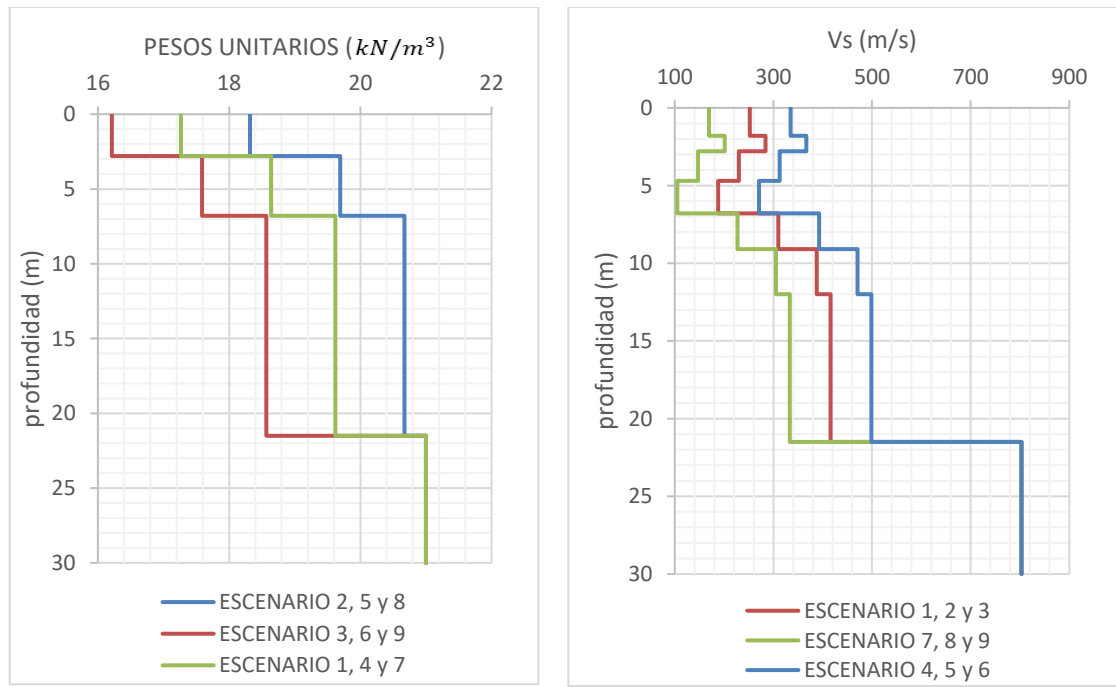
- Mampostería Confinada y Aporticada



**Figura 93.** Perfil Estratigráfico determinista del sitio de análisis 1.

**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.

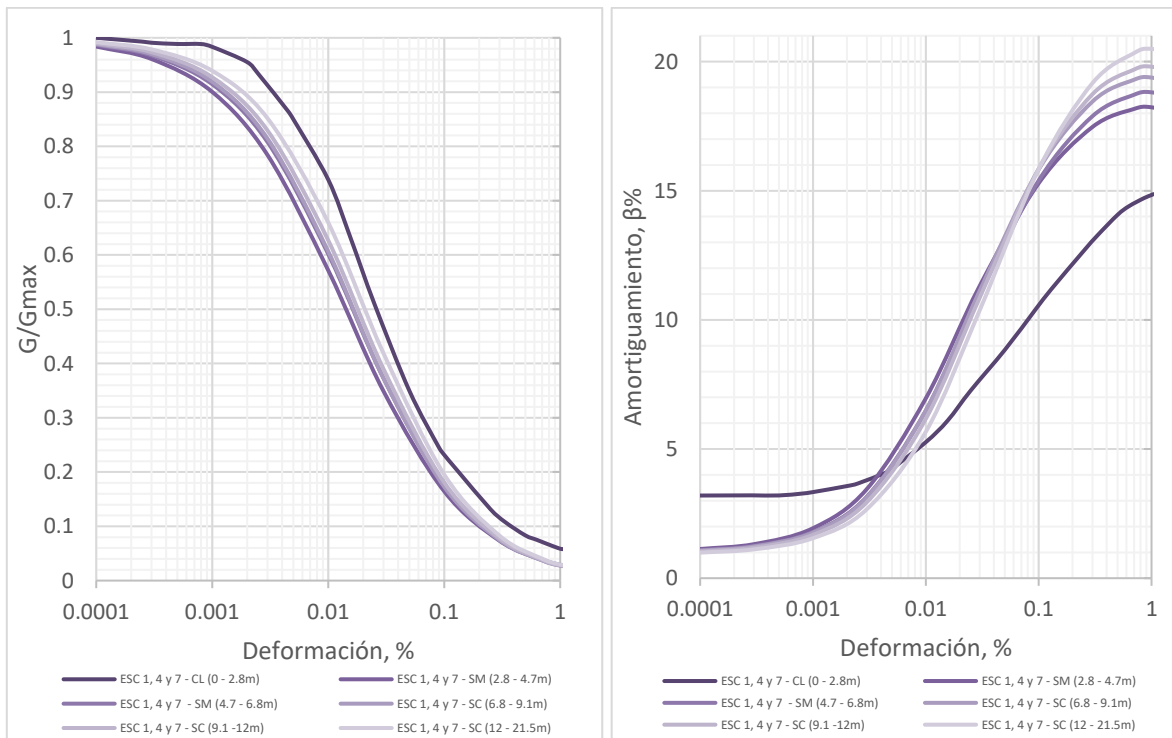
En el análisis de Respuesta sísmica, con el fin de tener en cuenta en cierta manera la variación de las propiedades de los suelos, especialmente los pesos unitarios y velocidad de onda de corte  $V_s$ , se establecieron 9 distintos escenarios de análisis. El escenario 1, corresponde al perfil determinista obtenido directamente de la caracterización geotécnica del capítulo IV, tal y como se evidencia en la Tabla 27. Posteriormente con desviación estándar de los pesos unitarios y velocidades onda de corte de cada uno de los distintos estratos de suelo se proyectaron los escenarios del 2 al 9. En la Figura 94 se muestran los valores que constituyen cada escenario analizado.



**Figura 94.** Relación profundidad vs pesos unitarios ( $kN/m^3$ ), y  $V_s$  (m/s) para cada uno de los escenarios analizados del sitio 1.

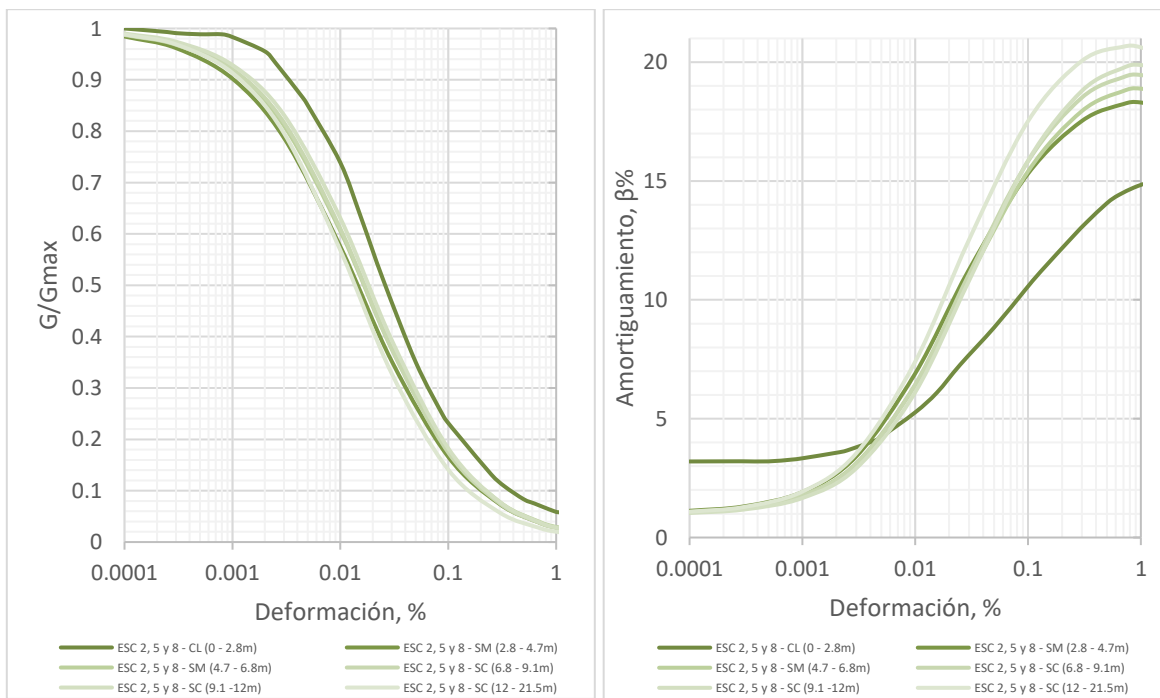
Fuente. Propia.

Aunque en el numeral 4.3.4. Modelo de comportamiento dinámico de los suelos del capítulo IV, se da a conocer las curvas de degradación del módulo de corte y variación del amortiguamiento para pequeñas, medianas y grandes deformaciones, estas se describen de manera general, por lo que, para cada uno de los estratos de suelo de los distintos escenarios analizados, se obtuvo las curvas dinámicas correspondientes; teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y dinámicas, lo anterior se evidencia en las figuras 95, 96 y 97.



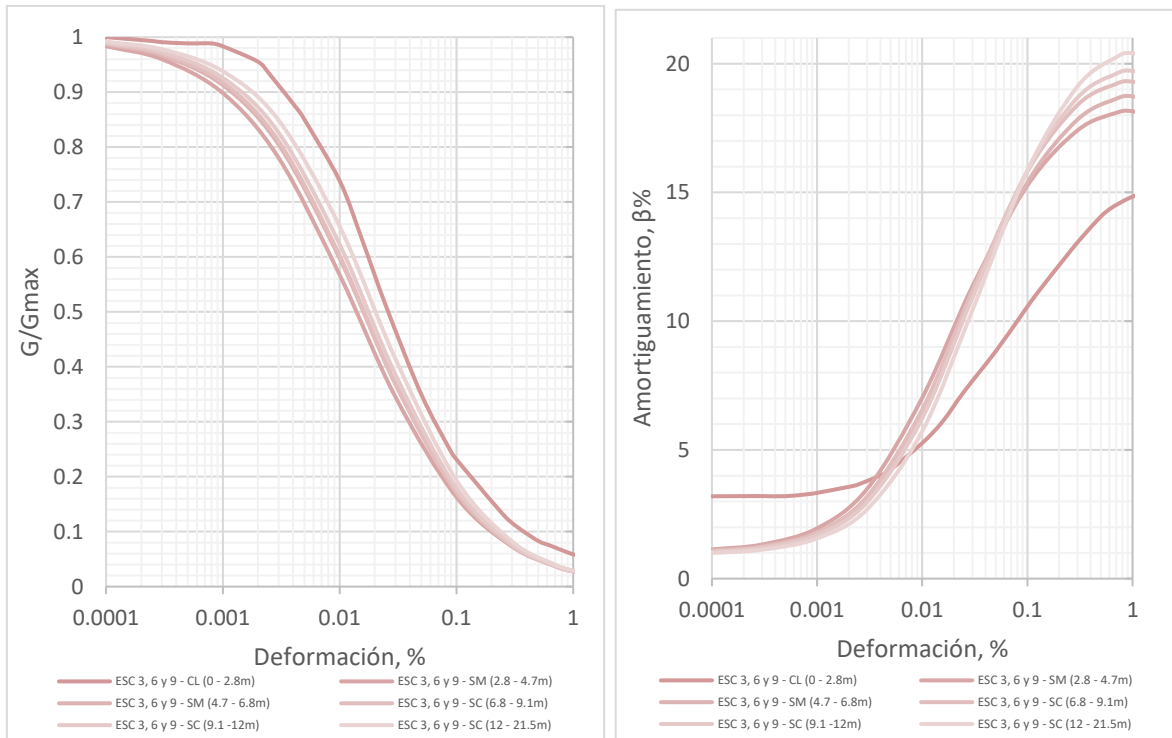
**Figura 95.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento), Escenario 1, 4 y 7

Fuente. Propia.



**Figura 96.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento), Escenarios 2, 5 y 8.

Fuente. Propia.

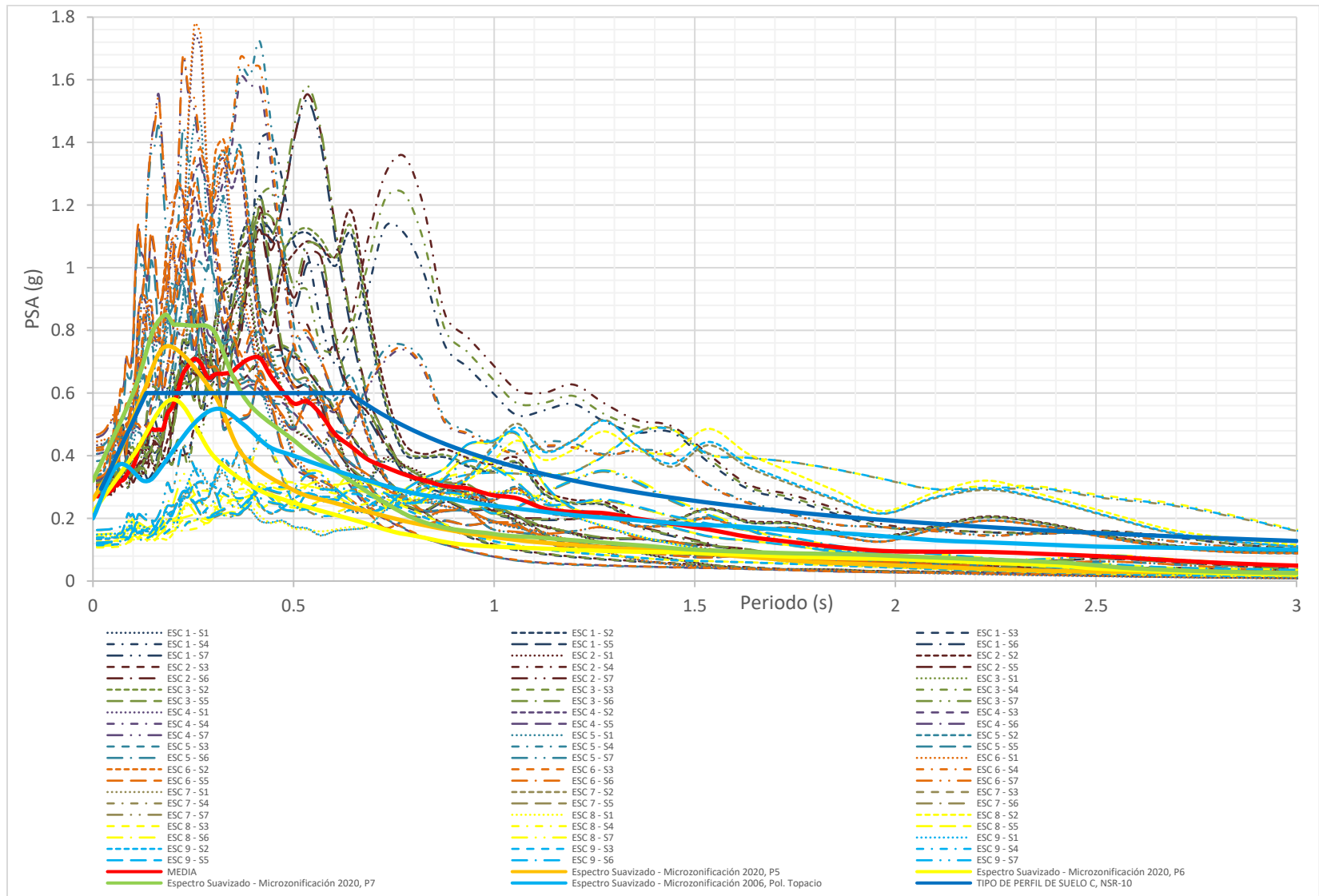


**Figura 97.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento,  $\beta\%$ ), Escenarios 3, 6 y 9.

Fuente. Propia.

Una vez determinada la repuesta en superficie de los escenarios modelados, se obtuvieron los espectros de respuesta en función de cada evento sísmico, adicionalmente se obtuvo espectro de los valores medios, tal y como se evidencia en la Figura 98.





**Figura 98.** Espectros de respuesta en superficie – Sitio de análisis 1.  
**Fuente.** Propia, obtenida a partir de resultados arrojados por DEEPSOIL V7.0

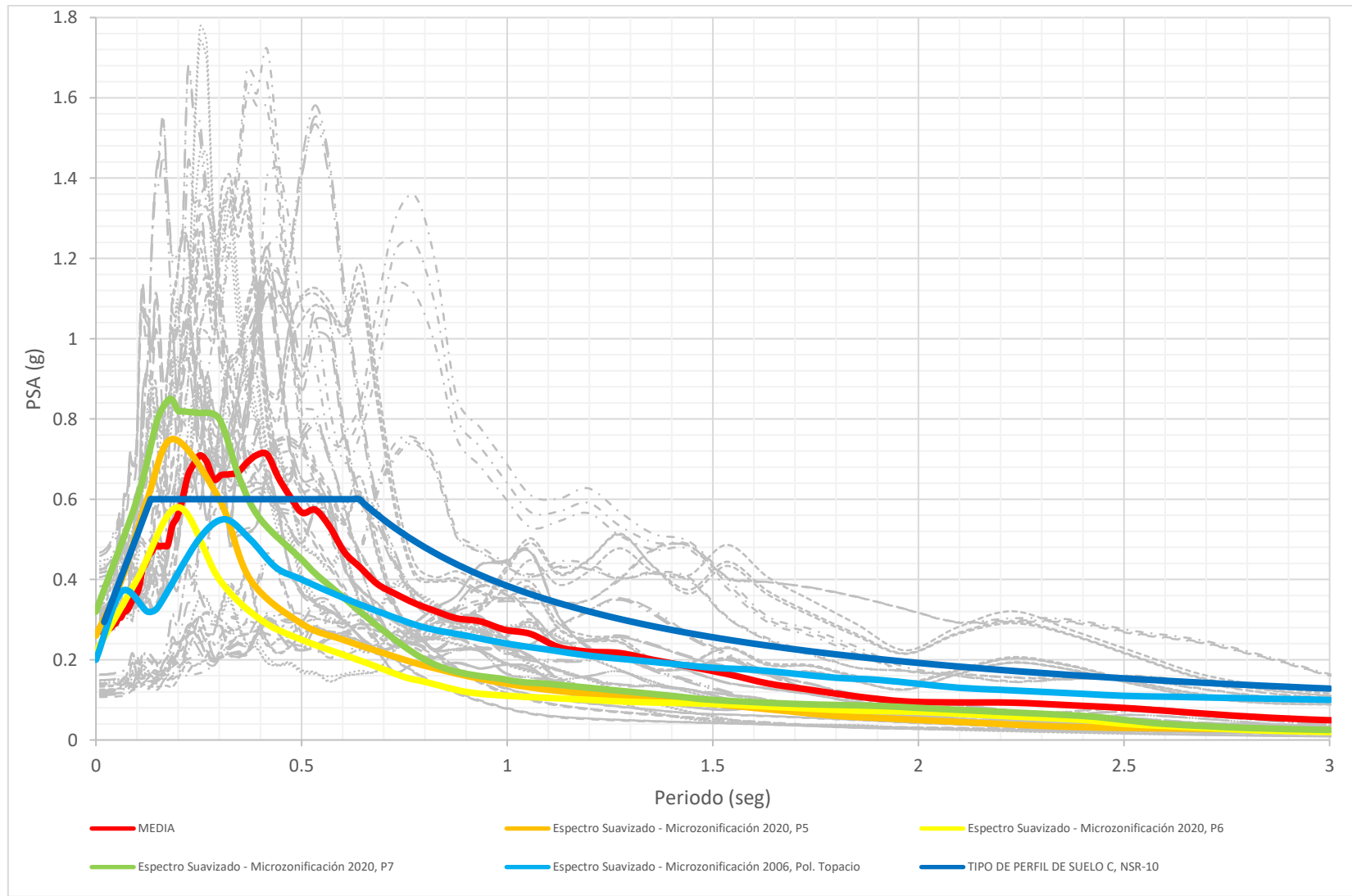
Se obtuvo el espectro promedio de respuesta, a partir del análisis de las respuestas en superficie para cada escenario y siguiendo los lineamientos establecidos en el inciso (a) del literal A.2.7 FAMILIA DE ACELEROGRAMAS, del título A de la NSR-10, en el cual establece:

*Debe utilizarse, para efectos de diseño, la respuesta ante la componente horizontal de un mínimo de tres (3) acelerogramas diferentes, todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismo de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posible. Si se utilizan siete o más acelerogramas, en vez del mínimo de tres prescritos anteriormente, se puede utilizar el valor promedio de los valores obtenidos de todos los acelerogramas empleados en vez de considerar los valores máximos de los análisis individuales.*

Una vez lo anterior se realizó su comparación con el espectro de diseño para un perfil de suelo tipo C, obtenido por medio de lo detallado en el título A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10, el espectro de respuesta suavizado recomendado en el estudio de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la ciudad de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2006, para el sitio ubicado en el Pol. Topacio y con los espectros de respuesta suavizados recomendados en la actualización de la Microzonificación Sísmica en el municipio de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2020, para los puntos de análisis P5, P6 y P7.

En la Figura 99, se evidencia que el espectro de respuesta para el sitio de análisis 1, presenta aceleraciones espectrales de 0.27g en periodos de 0s, así mismo, picos máximos de aceleración espectral de 0.71g que fluctúa entre periodos fundamentales de 0.25s a 0.40s; la distribución de aceleraciones de la respuesta en superficie del sitio 1 alcanza valores mayores que la arrojada en el punto P6 y menores que en los puntos de análisis P5 y P7 de la Microzonificación Sísmica de Ibagué del año 2020. Adicionalmente, entre los periodos de 0,35s y 1,9s, las aceleraciones de la respuesta sísmica en superficie del punto de análisis 1 son superiores a las dadas en la microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué del año 2020, luego de dicho periodo las respuestas comparadas son muy cercanas.

Por otro lado, al comparar la respuesta en superficie con la arrojada en la Microzonificación Sísmica de Ibagué del año 2006, ocurre un comportamiento contrario al anterior, ya que en el espectro de respuesta del polideportivo Topacio, para periodos menores de 1s las aceleraciones espectrales son menores a las obtenidas con el presente análisis, tomando valores máximos de 0.55g, y luego de dicho periodo, aumentan con respecto al espectro del punto de análisis 1 y los de la Microzonificación Sísmica del año 2020.



**Figura 99.** Comparación espectros de diseño (NSR-10, Microzonificación 2006 y Estudio de respuesta - sitio de análisis 1.  
**Fuente.** Propia.

## 7.2. Sitio de análisis 2

El perfil estratigráfico de la Figura 100, muestra una profundidad de estratos de 40m, ubicado en la Urb. Villa Café sobre el cual predominan construcciones en mampostería confinada, Muros estructurales en concreto y aporticados de 1 a 5 niveles, además el suelo que subyace la zona es constituido por un estrato de 1.5m de arcilla arenosa café de consistencia dura, seguido de 2m de arcilla café con vetas de óxido y gravas gruesas, 5.3m de arena arcillosa café y por 16.2m de gravas en matriz arcillosa y arenosa de color café con densidad muy compacta; y posteriormente un estratos de gravas compactas y arenas gravosas con velocidad de onda de 608m/s, que logran alcanzar los 40m de profundidad.

En la Tabla 32, se evidencia las características mecánicas y dinámicas del perfil estratigráfico determinista; ahora bien, tal y como se tomó en cuenta en el sitio de análisis 1, con la finalidad de contemplar la variación de las propiedades de los suelos, se diferenciaron 6 distintos escenarios de análisis, cuyas propiedades fueron determinadas con base en las desviaciones estándares de los pesos unitarios y velocidades onda de corte de cada uno de los distintos estratos de suelo (Ver Figura 101).

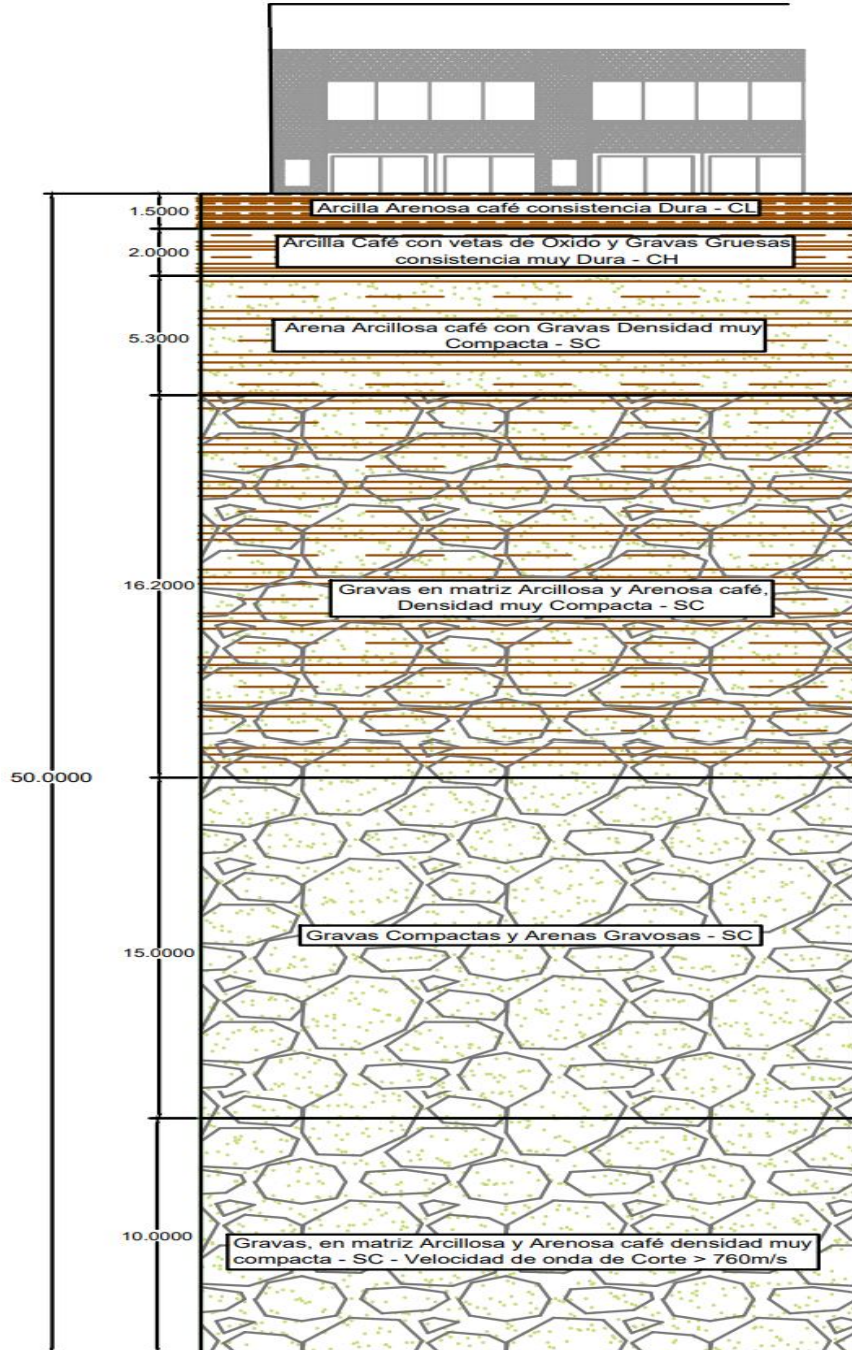
**Tabla 32.**

*Perfil geotécnico sitio de análisis 2*

ESCENARIO 1 – PERFIL DETERMINISTA								
CAPA	Estrato (m)		Espesor m	Tipo de Suelo S.U.C. S	IP %	Pasa 200 (%)	Peso Unitario <i>kN/m<sup>3</sup></i>	Vs m/s
	De	Hasta						
1	0	1	1.0	CL	21.4	-	19.31	
2	1	1.5	0.5	CL	10	-	20.23	
3	1.5	3.5	2.0	CH		-		387.85
4	3.5	7.5	4.0	SC		42.61		
5	7.5	8.8	1.3	SC	30	40.83	21.32	
6	8.8	25	16.2	SC		8.87		520.48
7	25	40	15.0	SC		-		608.07
<b>PROMEDIO</b>							20.88	438.25
<b>DESVIACIÓN</b>							0.80	89.72

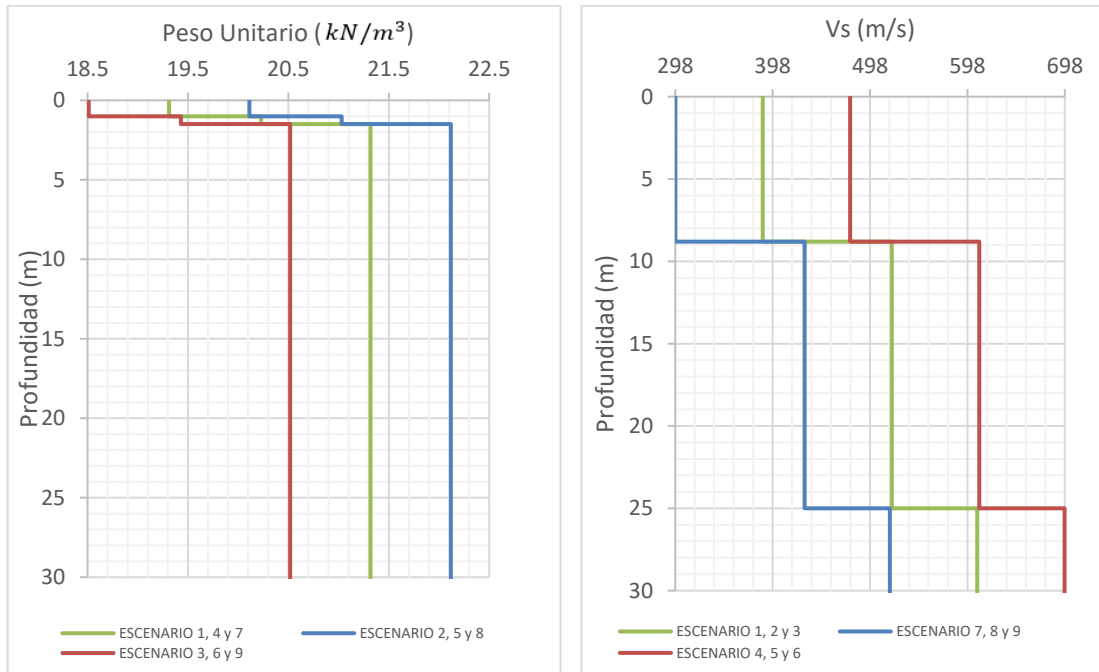
Fuente. Propia.

**URB. VILLA CAFÉ**  
**Uso predominante:**  
 - Residencial  
**No. Niveles:**  
 - 1 a 5 niveles  
**Sistemas estructurales comunes:**  
 - Mampostería Confinada, Muros

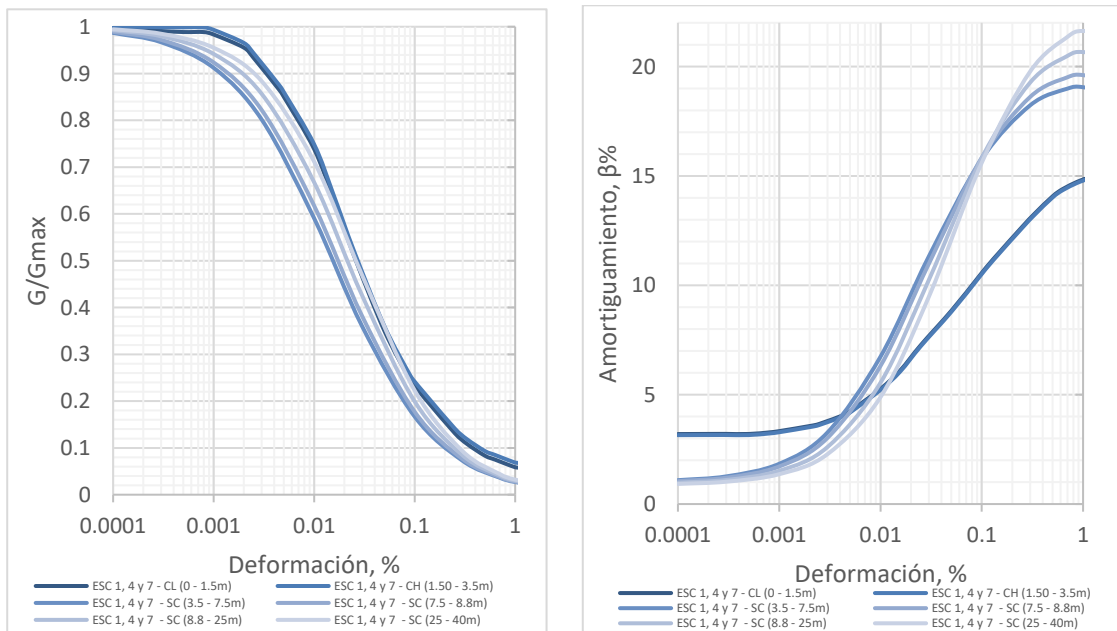


**Figura 100.** Perfil Estratigráfico determinista del sitio de análisis 2.  
**Fuente.** Propio, con ayuda de la información de los modelos de exposición.

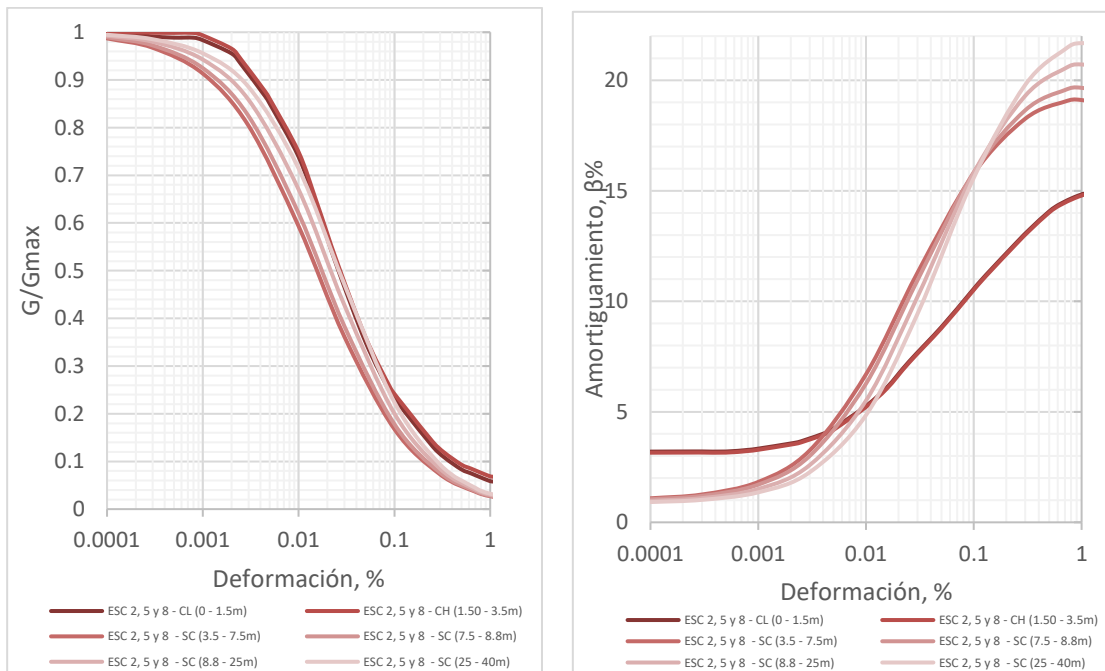
Así mismo en la Figura 102, 103 y 104, se muestran las curvas dinámicas implementadas para cada una de las capas de suelos de los 9 distintos escenarios analizados, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y dinámicas.



**Figura 101.** Relación profundidad vs pesos unitarios ( $kN/m^3$ ), y Vs (m/s) para cada uno de los escenarios analizados del sitio 2.  
Fuente. Propia.

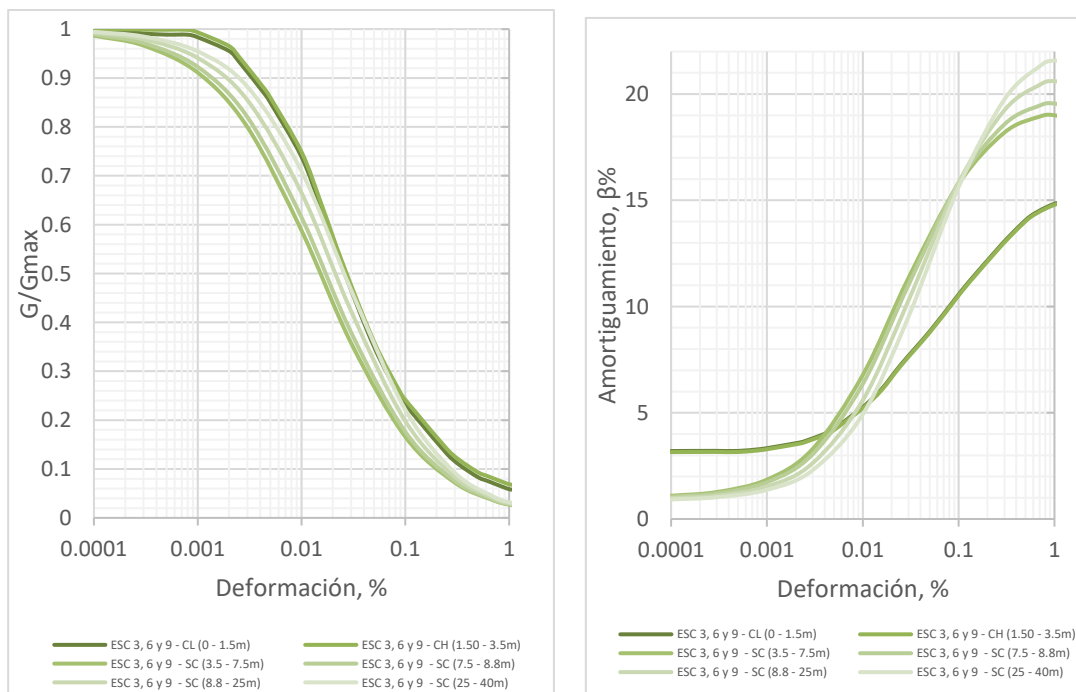


**Figura 102.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento,  $\beta\%$ ), Escenarios 1, 4 y 7.  
Fuente. Propia.



**Figura 103.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento), Escenarios 2, 5 y 8.

Fuente. Propia.



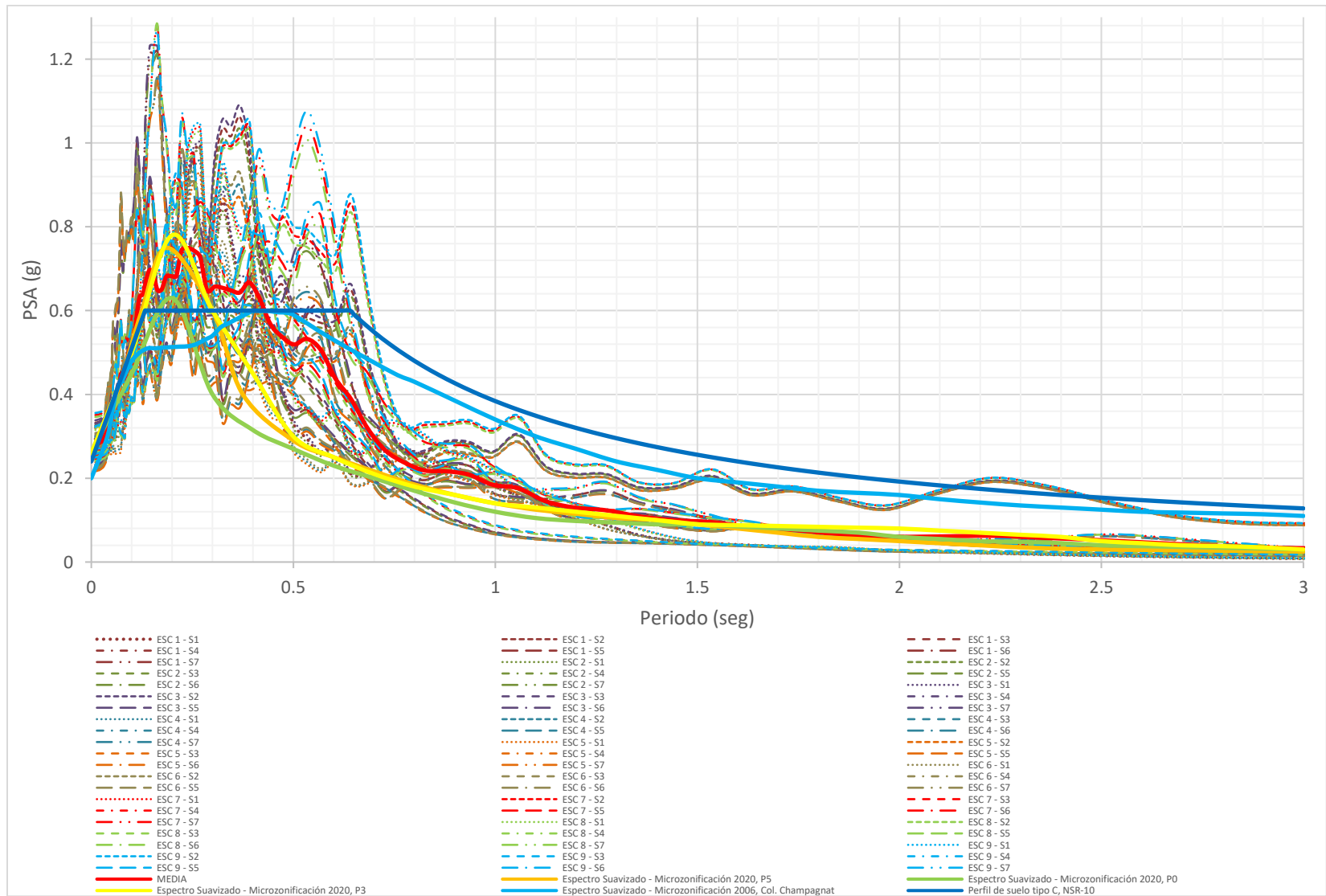
**Figura 104.** Curvas dinámicas de los estratos de suelo (Degradación del módulo de corte ( $G/G_{max}$ ) y variación del amortiguamiento), Escenarios 3, 6 y 9.

Fuente. Propia.

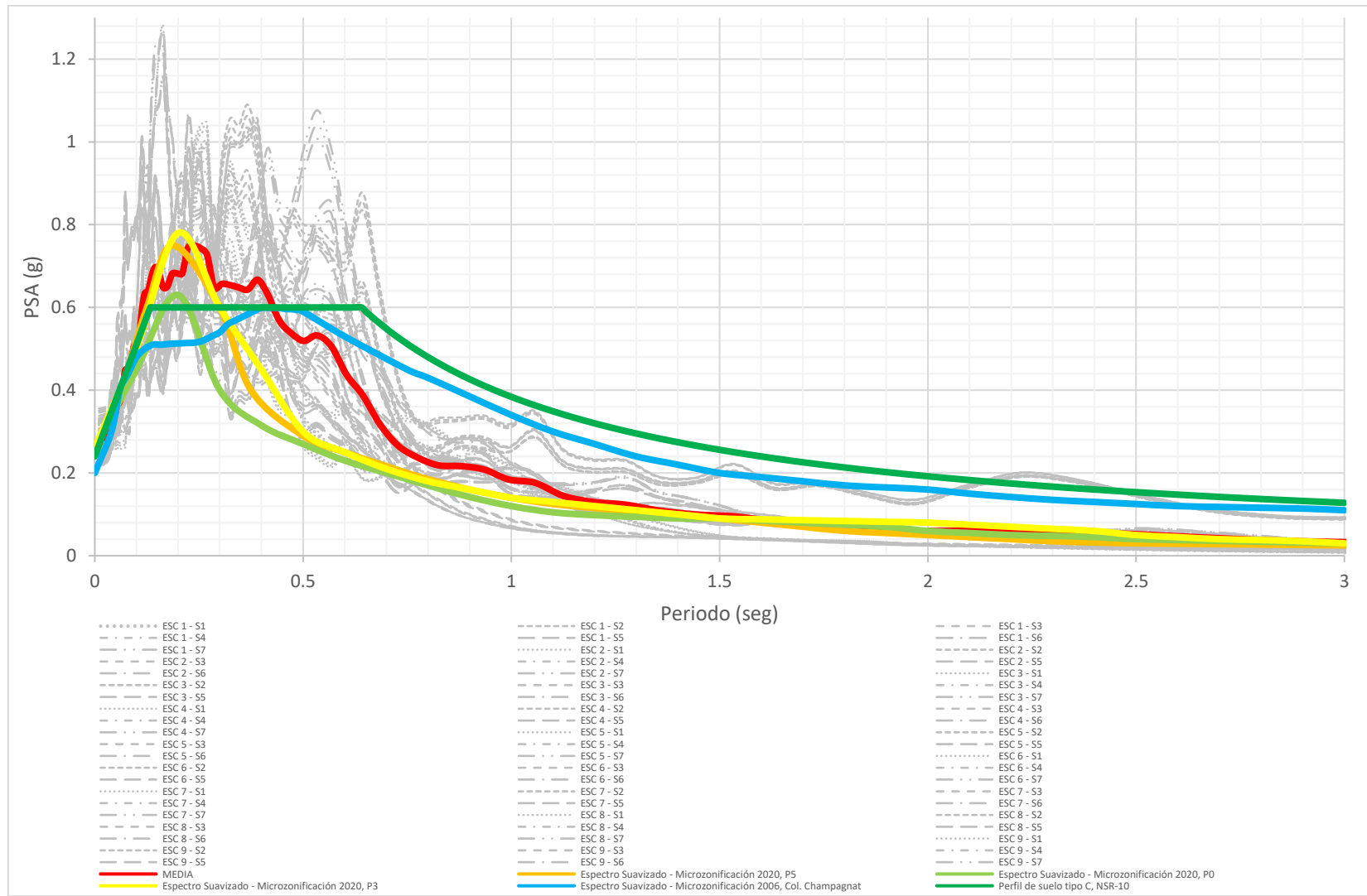
Tal y como se desarrolló para el sitio de análisis 1, una vez que se obtuvo las respuestas en superficie de cada escenario analizado y el espectro medio de respuesta, se establece la comparación frente al espectro de diseño para perfil de suelo C, obtenido por medio de lo detallado en el título A del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente NSR-10, el espectro de respuesta suavizado recomendado en el estudio de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la ciudad de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2006, para el sitio ubicado en el Colegio Champagnat y además con los espectros de respuesta suavizados recomendados en la actualización de la Microzonificación Sísmica en el municipio de Ibagué, elaborado por la Universidad de los Andes, en el año 2020, para los puntos de análisis P0, P3 y P5 (Ver Figura 105).

De acuerdo con lo evidenciado en la Figura 106, el espectro de respuesta para el sitio de análisis 2, presenta aceleraciones espectrales de 0.28g en periodos de 0s, así mismo una máxima aceleración de 0.75g para periodos de 0.22s; la distribución de las aceleraciones de la respuesta es cercana presentando similitud con las arrojadas en los puntos de análisis P5 y P3 de la Microzonificación Sísmica de Ibagué del año 2020. Lo contrario ocurre la observar la distribución frente al espectro armonizado del Colegio Champagnat arrojado de la Microzonificación Sísmica de Ibagué del año 2006, el cual toma valores muy similares al espectro de diseño para perfil tipo C de la normal NSR-10.





**Figura 105.** Espectros de respuesta en superficie – Sitio de análisis 2.  
**Fuente.** Propia, obtenido a partir de resultados arrojados por DEEPSOIL V7.0



**Figura 106.** Comparación espectros de diseño (NSR-10, Microzonificación 2006 y Estudio de respuesta sitio de análisis 2)  
**Fuente.** Propia.

Los resultados de los análisis de respuesta sísmica tienen en cuenta los efectos de sitio producidos por las propiedades mecánicas y dinámicas de los estratos de suelo que componen el perfil, tanto para el sitio de análisis 1 como del 2. En la Tabla 33, se evidencia el periodo predominante y medio del sismo en roca ( $T_p$  y  $T_m$ ). Lo cuales, son comparados frente a los periodos de vibración de la respuesta en superficie de cada sismo. Al contemplar el comportamiento de cada una de las capas que conforman el depósito de suelo, se corroboró que en dichas zonas se pueden llegar a presentar amplificaciones sísmicas y posibles fenómenos de resonancia por interacción entre el suelo, sismo y edificaciones con periodos fundamentales de vibración cercanos al periodo predominante en superficie.

**Tabla 33**

*Relación periodos predominantes de vibración en roca y superficie*

<b>Descripción registro sísmico (Estación)</b>	<b><math>T_p</math></b>	<b><math>T_m</math></b>	<b><math>T_p</math> en superficie (s)</b>	
	<b>(s)</b>	<b>(s)</b>	<b>SA_1</b>	<b>SA_2</b>
San Fernando (Pasadena)	0.26	0.31	0.32	0.26
Iwate (IWT010)	0.36	0.51	0.36	0.32
Parkfield – Turkey Flat #1 (0M)	0.26	0.35	0.26	0.26
Kobe University	0.42	0.68		
Tarapaca (Tara06r)	0.42	0.67	0.26	0.27
Tarapaca (Tara09r)	0.22	0.34	0.56	0.22
Tarapaca (Tara08r)	0.16	0.28	0.22	0.16

Fuente. Propia.

## Capítulo VIII

### Interacción Sísmica Suelo-Estructura

#### 8.1. Descripción y propiedades de las edificaciones

Teniendo en cuenta la caracterización estructural de la zona establecida en el Capítulo III, las edificaciones predominantes son las de 2 niveles en mampostería confinada, de 5 niveles en mampostería estructural y 12 niveles en muros estructurales en concreto. Así mismo, considerando que las edificaciones con periodos fundamentales de vibración entre un 0.11s y 0.42s, presentan una mayor probabilidad de generar fenómenos de resonancia sísmica por su similitud con los periodos de vibración del suelo, se optó por hacer uso de las siguientes tipologías de edificaciones:

- Edificación de 2 niveles en mampostería confinada con periodos de vibración de 0.12s para ambos perfiles
- Edificación de 3 niveles con periodos de vibración cercano a 0.3g, en sistema aporticado, para el sitio de análisis 1.

Además de lo anterior, en el capítulo VI se estableció que se podrían presentar picos de aceleraciones espectrales en superficie sobre periodos de vibración de hasta 0.56s, por tal motivo, se seleccionó una edificación de 5 niveles con estructura aporticada y periodo fundamental de vibración igual a 0.57s para el sitio de análisis 2. En la Tabla 34 se muestran las características de las edificaciones seleccionadas para los análisis de ISSE.

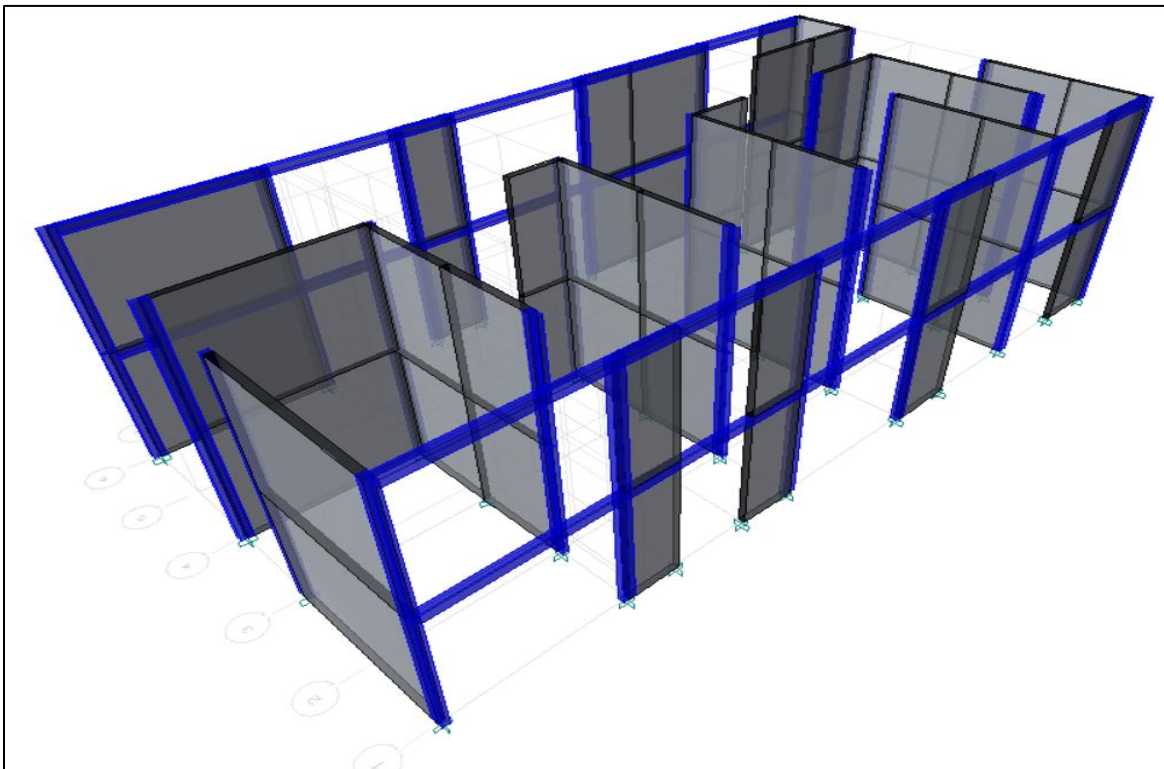
**Tabla 34.**

*Características generales de las edificaciones*

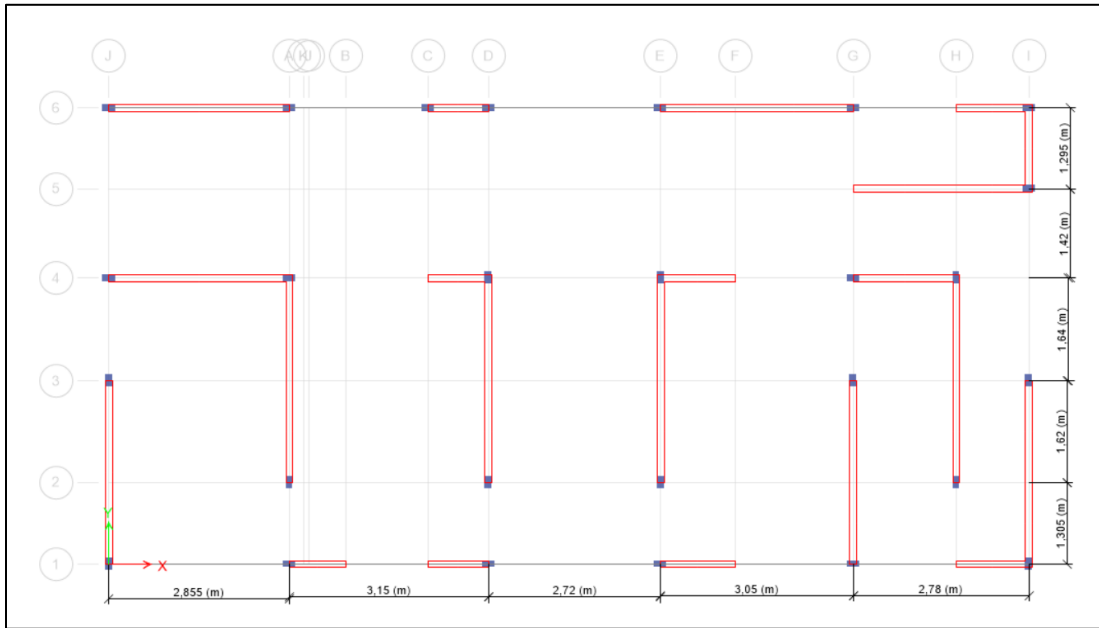
Descripción de la edificación	No. Niveles	No. Sótanos	Sistema estructural	Uso	Te (s)	f (Hz)
Edificación en dos niveles con cubierta en placa	2	0	Mampostería confinada	Residencial	0.11	9.09
Edificación en tres niveles con cubierta en placa	3	0	Pórticos Resistentes a Momentos	Residencial	0.28	3.57
Edificación en cinco niveles con cubierta en placa	5	0	Pórticos Resistentes a Momentos	Residencial	0.57	1.75

*Fuente. Propia*

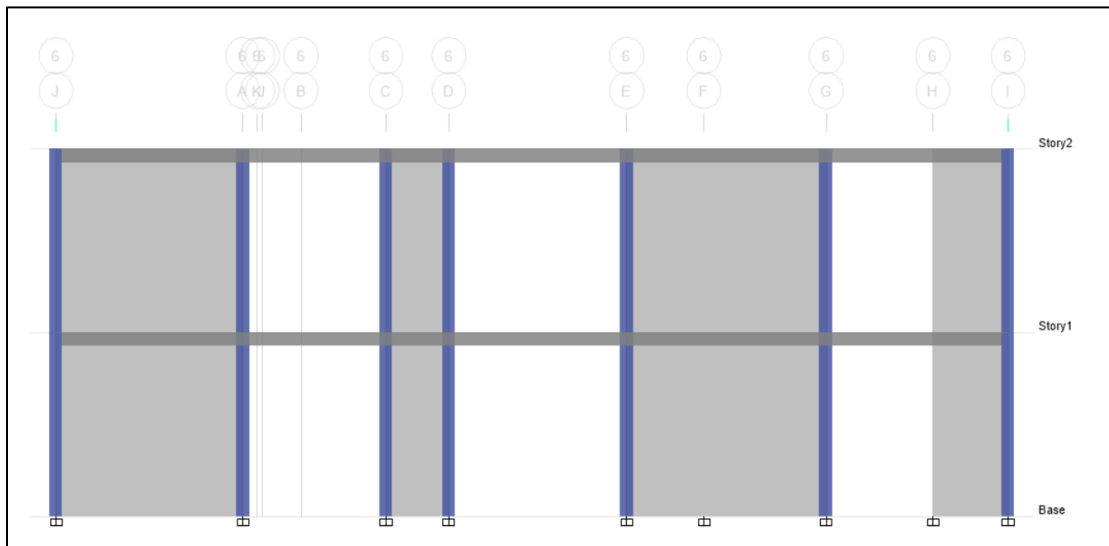
Para determinar las propiedades de la demanda sísmica de cada edificación; se hizo uso del software de Análisis y Diseño Estructural ETABS V19.0, por medio del cual se realizó la simulación de las propiedades y características estructurales. La edificación de dos niveles con cubierta en placa está conformada por un sistema estructural en mampostería confinada de 11cm de espesor, acompañada de columnetas de confinamiento y vigas de amarre de 20x11cm. Además, contempla una losa maciza de entrepiso y placa de cubierta de 10cm de espesor. En las figuras 107, 108 y 109 se evidencia la conformación 3D, la vista planta y vista en alzada de la edificación.



**Figura 107.** Vistas 3D - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0



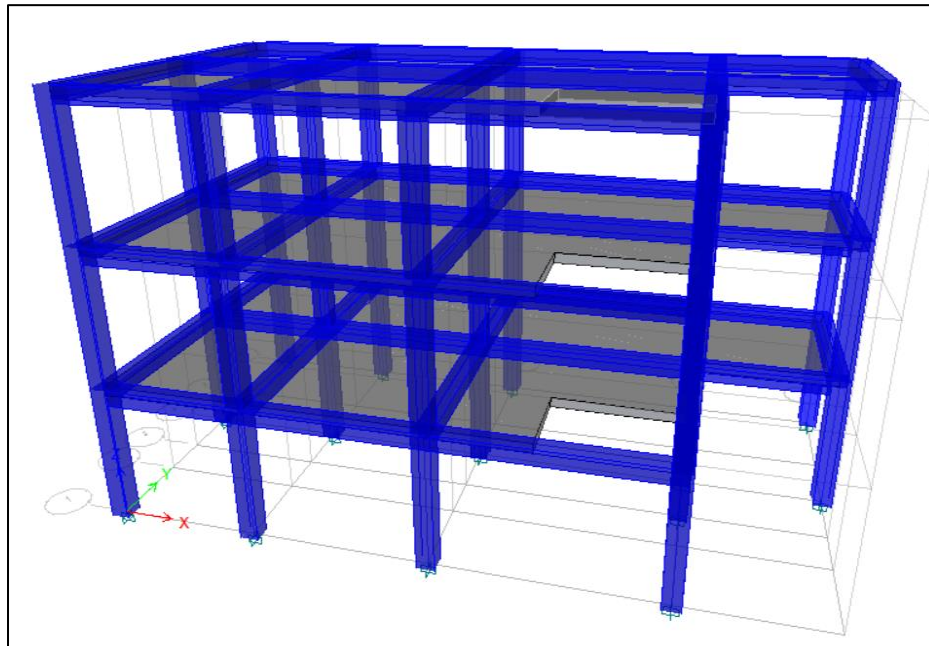
**Figura 108.** Vistas en planta - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0



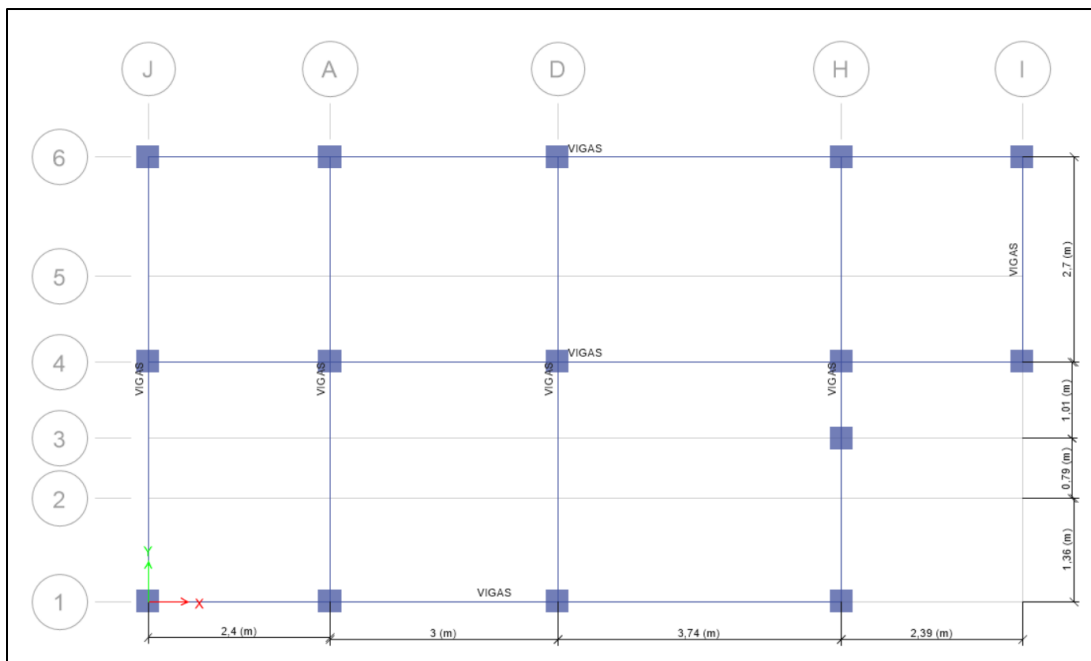
**Figura 109.** Vistas en alzada - Edificación de 2 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0

La edificación de 3 niveles y cubierta en placa está conformada por un sistema estructura de pórticos Resistentes a Momentos Pórticos Resistentes a Momentos. Además se constituye de losas macizas de entrepisos de 15cm de altura, vigas de 30x25cm y columnas de 30x30cm. Por otra parte, la edificación aporricada de 5 niveles y cubierta en placa se caracteriza por tener vigas de 30x40cm y 40x40cm, columnas de 30x50cm y losas aligeradas de entrepisos con viguetas 12x40cm, además, vigas de repartición de 10x4cm y

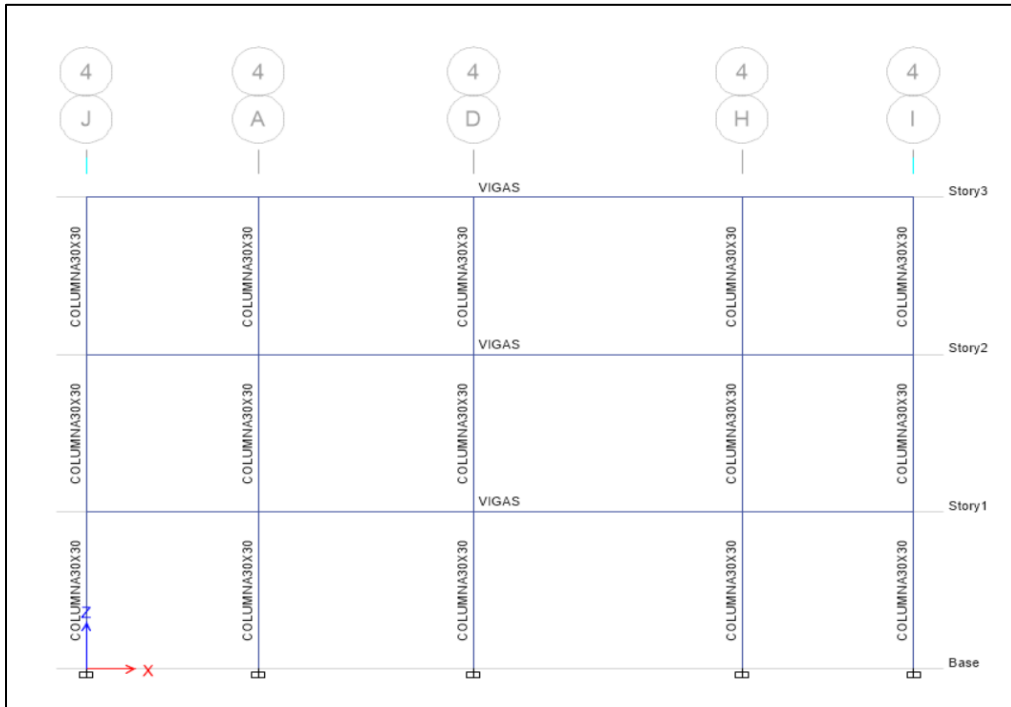
loseta de 5cm. En las figuras 100-115 se muestran las conformaciones en 3D y vistas en plan y alzada para las edificaciones de 3 y 5 niveles, respectivamente.



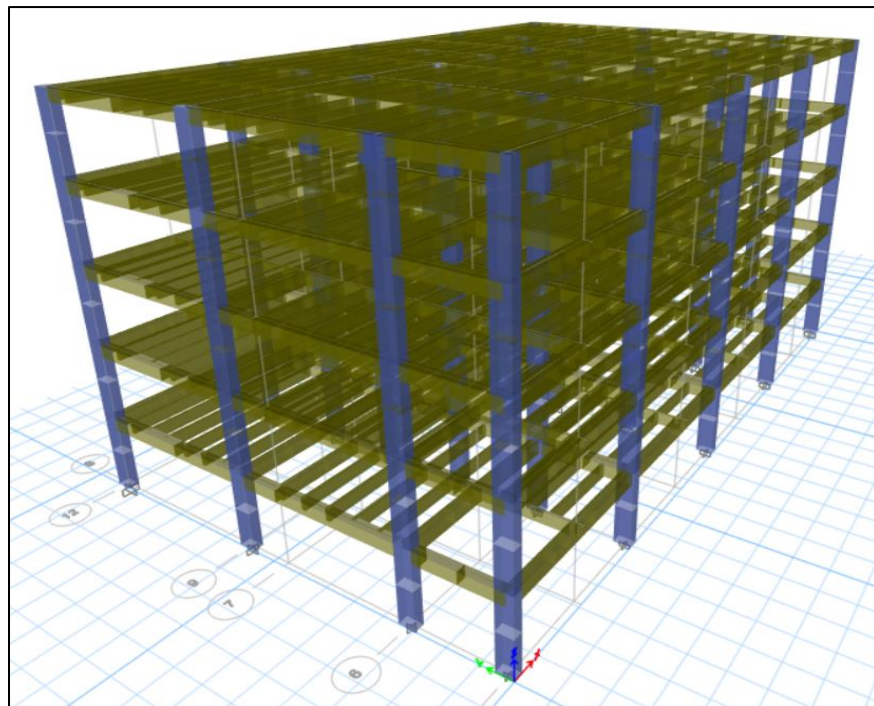
**Figura 110.** Vistas 3D - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0



**Figura 111.** Vistas en planta - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0

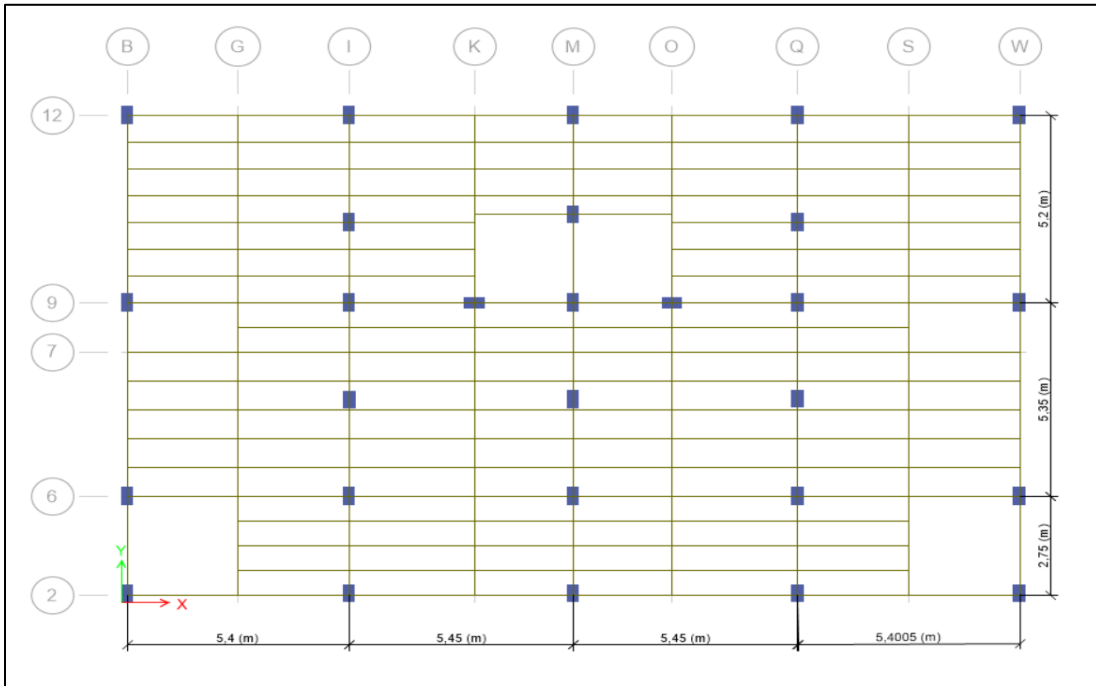


**Figura 112.** Vistas en alzada - Edificación de 3 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0

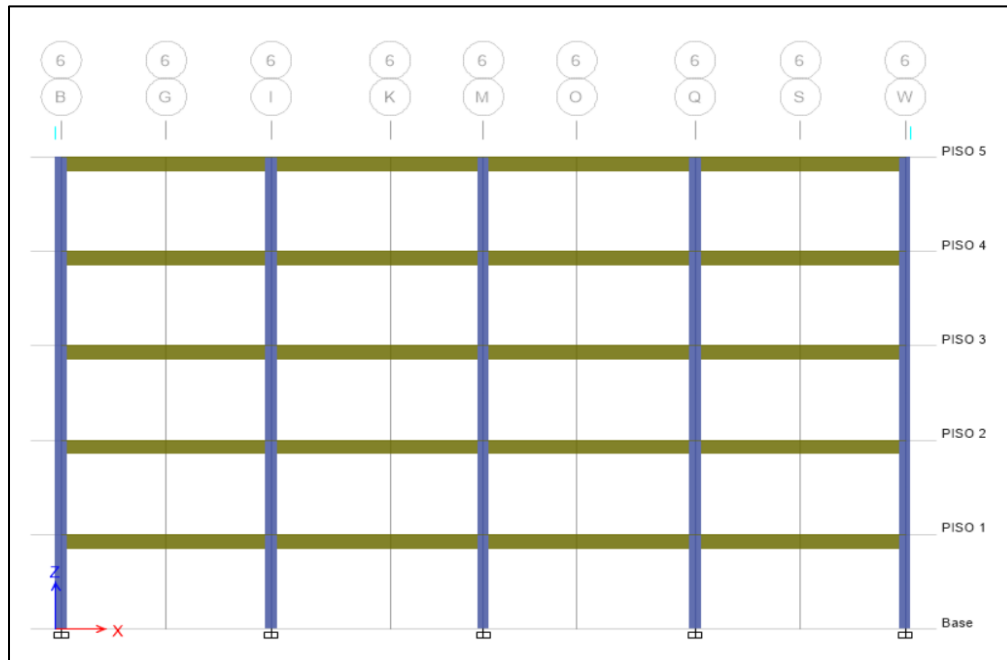


**Figura 113.** Vistas 3D - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0





**Figura 114.** Vistas en planta - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0



**Figura 115.** Vistas en alzada - Edificación de 5 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Propio, con ayuda del software ETABS V 19.0

Las características estructurales de cada una de las edificaciones implementadas, de acuerdo con lo descrito anteriormente se puede evidenciar en la Tabla 35.

**Tabla 35**

*Dimensiones de los elementos estructurales de las edificaciones*

<b>EDIFICACIÓN</b>	<b>2 NIVELES</b>	<b>3 NIVELES</b>	<b>5 NIVELES</b>
<b>Categoría UC</b>	BAJA	BAJA	MEDIA
<b>H entrepiso</b>	2.63 m	2.335 m	2.6 m
<b>Altura Total</b>	5.26 m	7.005 m	13 m
	<b><u>Vigas</u></b>	<b><u>Vigas</u></b>	<b><u>Vigas</u></b>
	0.11 x 0.20 m	0.30 x 0.25 m	0.40 x 0.40 m
	<b><u>Columnas</u></b>	<b><u>Columnas</u></b>	<b><u>Columnas</u></b>
<b>Secciones de Elementos Estructurales</b>	0.11 x 0.20 m 0.20 x 0.11 m	0.30 x 0.30 m	0.30 x 0.40 m
	<b><u>Losa de entrepiso</u></b>	<b><u>Losa de entrepiso</u></b>	<b><u>Losa de entrepiso</u></b>
	0.10 m	0.15m	0.30 x 0.50 m
	<b><u>Muros</u></b>		<b><u>Losa de entrepiso</u></b>
	0.11 m		0.05 m
			<b><u>Viguetas</u></b>
			0.12 x 0.40 m 0.10 x 0.40 m

Fuente. Propia

## 8.1.1. Propiedades de los materiales

### 8.1.1.1. Acero

El módulo de elasticidad del acero de refuerzo se estableció en 200.000 MPa con base en lo establecido en el numeral C.8.5.2, del Título C de la NSR-10, Además, para el cálculo de la resistencia específica a la fluencia ( $f_y$ ) se tomó como valor de referencia 420 MPa de acuerdo con lo indicado en el numeral C3.5.3.2 del reglamento en mención.

### 8.1.1.2. Concreto

El numeral C.1.1.1 del Título C de la NSR-10 proporciona los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de concreto estructural. Es por esto, que se implementó la resistencia específica a la compresión ( $f'_c$ ) como 28 MPa a todos los elementos estructurales, teniendo como base que la mínima permitida es 17 MPa. De la misma forma, acatando lo establecido en el numeral C.8.5.1 del Título C de la NSR-10, se hizo uso de la ecuación  $4700\sqrt{f'_c}$ , para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto.

La densidad del concreto se consideró como  $2.4\text{Ton}/\text{m}^3$  y la relación de Poisson igual a 0.2, como valor de referencia para fines de investigación.

b

### 8.1.1.3. Elementos de confinamiento en mampostería confinada

El Capítulo E.4 del Título E de la NSR-10, establece las especificaciones mínimas para el concreto, acero de refuerzo y muros en mampostería. Por tal motivo, se hizo uso de una resistencia a la compresión a los 28 días de 21MPa para las columnas y vigas de confinamiento, una resistencia a la fluencia de 420MPa para el acero de refuerzo y 8MPa como resistencia de los muros en mampostería. En la Tabla 36, se detallan las propiedades de los materiales que constituyen los elementos estructurales de cada edificación.

**Tabla 36.**

*Características estructurales de las edificaciones*

EDIFICACIÓN	2 NIVELES	3 NIVELES	5 NIVELES
<b>Categoría UC</b>	BAJA	BAJA	MEDIA
<b>H entrepiso</b>	2.63 m	2.335 m	2.6 m
<b>Altura Total</b>	5.26 m	7.005 m	13 m
<b>Concreto Estructural</b>	E= 21.525 MPa f'c = 21 MPa v= 0.2 G= 8.968.98 MPa $\rho = 2.400 \text{ kg}/\text{m}^3$	E= 24.855 MPa f'c = 28 MPa v= 0.2 G= 10.357 MPa $\rho = 2.400 \text{ kg}/\text{m}^3$	E= 24.855 MPa f'c = 28 MPa v= 0.2 G= 10.357 MPa $\rho = 2.400 \text{ kg}/\text{m}^3$
<b>Acero de refuerzo</b>	E= 200.000 MPa fy= 420 MPa $\rho = 7.850 \text{ kg}/\text{m}^3$	E= 200.000 MPa fy= 420 MPa $\rho = 7.850 \text{ kg}/\text{m}^3$	E= 200.000 MPa fy= 420 MPa $\rho = 7.850 \text{ kg}/\text{m}^3$
<b>Mampostería Confinada</b>	E= 3.923 MPa f'm= 8 MPa $\rho = 1.428 \text{ kg}/\text{m}^3$		

Fuente. Propia

### 8.1.2. Cargas

Las edificaciones implementadas en el análisis son destinadas a uso residencial, por tal motivo se tomó como referencia lo establecido en las tablas B.3.4.3-1 y B.4.2.1-1 del Título B de la NSR-10. En la Tabla 37 se detallan las asignaciones de las cargas vivas y muertas, respectivamente, para cada estructura. Por otra parte, el peso propio de los

elementos estructurales es asumido directamente por el software de Análisis y Diseño Estructural ETABS V19.0 realizando la asignación de las dimensiones y propiedades de los materiales que conforman cada elemento estructural.

**Tabla 37.**

*Avaluó de cargas vivas y muertas*

Tipo	Uso	Ocupación o Uso	Avaluó (kPa)	
			Entrepisos	Placa de cubierta
Viva	Residencial	Cuartos privados y sus corredores	1.8	1.8
		Escalera	3.0	-
Muerta	Residencial	Fachadas y particiones de mampostería	3.0	-
		Afinado de piso y cubierta	-	1.6
		Empozamiento de agua	-	0.5

**Fuente.** Propia, con ayuda de la información de las tablas B.3.4.3-1 y B.4.2.1-1 del Título B de la NSR-10.

### 8.1.3. Determinación de pórticos bidimensionales

Al realizar la modelación de las edificaciones en el software de elementos finitos Plaxis 2D V120, se requiere establecer elementos bidimensionales. Por esta razón, se obtuvieron pórticos simplificados para cada edificación conservando las distancias y alturas de entrepisos. Además, se modificaron las secciones de los elementos estructurales para garantizar la similitud con los periodos fundamentales de vibración de las edificaciones originales.

En las tablas 38, 39 y 40, se muestran las características generales y las propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos estructurales (vigas, columnas y elementos de cimentación) que conforman cada uno de los pórticos implementados.

**Tabla 38.**

*Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos tipo viga de los pórticos simplificados*

Descripción del pórtico		Pórtico de dos niveles con cubierta en placa.	Pórtico de tres niveles con cubierta en placa.	Pórtico de cinco niveles con cubierta en placa.
<b>Eje</b>		1	4	4
<b>H (m)</b>		5.26	7.00	13.0
<b>Te (s)</b>		0.12	0.28	0.57
<b>Vigas</b>	<b>Base (m)</b>	0.5	0.6	0.3
	<b>Altura (m)</b>	0.65	0.5	1.4
	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0.325	0.28	1.24
	<b>Inercia (m<sup>4</sup>)</b>	6.77x10 <sup>-3</sup>	7.23x10 <sup>-3</sup>	8.4x10 <sup>-2</sup>
	<b>EA (kN)</b>	7x10 <sup>6</sup>	6.93x10 <sup>6</sup>	3.097x10 <sup>7</sup>
	<b>EI (kN/m)</b>	1.46x10 <sup>5</sup>	1.8x10 <sup>5</sup>	2.097x10 <sup>6</sup>
	<b>Peso (kN/m/m)</b>	7.66	6.57	29.32

Fuente. Propia

**Tabla 39.**

*Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos tipo columna de los pórticos simplificados*

Descripción del pórtico		Pórtico de dos niveles con cubierta en placa.	Pórtico de tres niveles con cubierta en placa.	Pórtico de cinco niveles con cubierta en placa.
<b>Eje</b>		1	4	4
<b>H (m)</b>		5.26	7.00	13.0
<b>Te (s)</b>		0.12	0.28	0.57
<b>Columnas</b>	<b>Base (m)</b>	0.8	0.55	1.0
	<b>Altura (m)</b>	0.6	0.65	1.45
	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0.48	0.35	1.45
	<b>Inercia (m<sup>4</sup>)</b>	2.56x10 <sup>-2</sup>	9.01x10 <sup>-3</sup>	1.2x10 <sup>-1</sup>
	<b>EA (kN)</b>	1.03x10 <sup>7</sup>	8.897x10 <sup>6</sup>	3.60x10 <sup>7</sup>
	<b>EI (kN/m)</b>	5.51x10 <sup>5</sup>	2.247x10 <sup>5</sup>	3x10 <sup>6</sup>
	<b>Peso (kN/m/m)</b>	11.31	8.42X	34.17

Fuente. Propia

**Tabla 40.**

*Características generales y propiedades de rigidez (flexión y axial) de los elementos de cimentación de los pórticos simplificados*

Descripción del pórtico	Pórtico de dos niveles con cubierta en placa.	Pórtico de tres niveles con cubierta en placa.	Pórtico de cinco niveles con cubierta en placa.
<b>Eje</b>	1	4	4
<b>H (m)</b>	5.26	7.00	13.0
<b>Te (s)</b>	0.12	0.28	0.57
<b>Tipo</b>	Vigas de cimentación	Zapatas aisladas	Losa
	0.3x0.3	1x1x0.315	0.5m de altura
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	0.067	0.315	0.50
<b>Inercia (m<sup>4</sup>)</b>	3.72x10 <sup>-4</sup>	2.60x10 <sup>-3</sup>	1.04x10 <sup>-2</sup>
<b>EA (kN)</b>	1.44x10 <sup>6</sup>	7.83x10 <sup>6</sup>	1.247x10 <sup>7</sup>
<b>EI (kN/m)</b>	8x10 <sup>3</sup>	6.477x10 <sup>4</sup>	2.6x10 <sup>5</sup>
<b>Peso (kN/m/m)</b>	1.57	7.42	11.78

Fuente. Propia

#### 8.1.4. Coeficientes de amortiguamiento Rayleigh

El Amortiguamiento de un material es causado principalmente por las propiedades de viscosidad, fricción y desarrollo de deformaciones plásticas; sin embargo, el amortiguamiento como único valor, no representa de manera confiable las características dinámicas reales del material. En la matriz de amortiguamiento el coeficiente de Rayleigh  $\alpha$  determina la influencia de la masa (M) y el coeficiente  $\beta$ , la influencia de la rigidez (K), (Bentley, 2020).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (8)$$

Los coeficientes de amortiguamiento Rayleigh tienen relación con la frecuencia angular y la razón de amortiguamiento, lo que permite determinar la respuesta dinámica de una estructura a mayor detalle, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \beta \omega^2 = 2\omega\xi \quad (9)$$

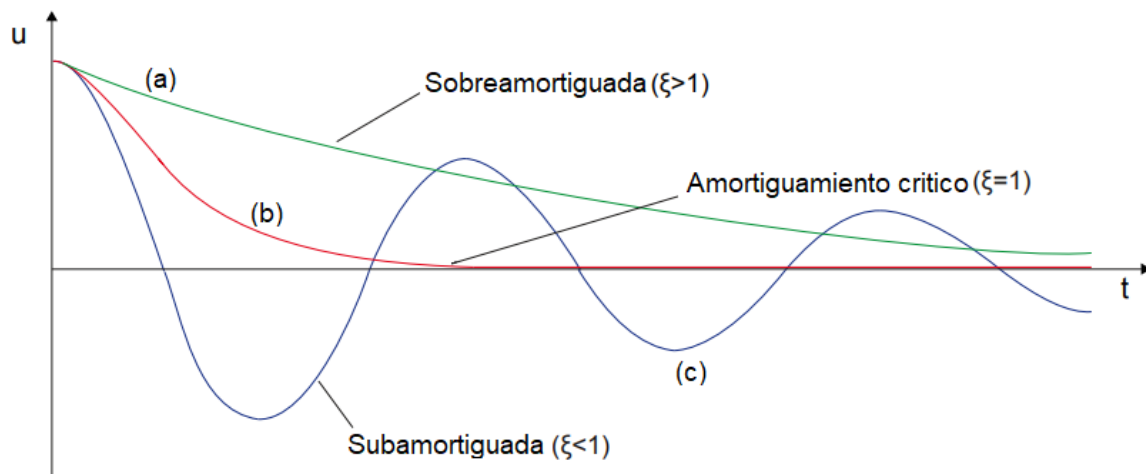
Donde,

$$\omega = \text{Frecuencia angular en rad/s} = 2\pi f$$

$f$  = Frecuencia en Hz

$\xi$  = La razón de amortiguamiento, la cual es un valor adimensional que representa la cantidad que amortiguamiento que tiene una estructura con respecto al amortiguamiento crítico, asimismo, puede ser medida mediante el cálculo del decremento logarítmico  $\delta$  (logaritmo natural de la relación entre dos amplitudes máximas), obtenido de la señal vibratoria amortiguada =  $\delta/2\pi$ .

La Figura 116, evidencia el comportamiento de la gráfica tiempo – desplazamiento para diferentes tipos de estructuras, si  $\xi > 1$  (Línea a) la estructura oscila de manera lenta frente a una excitación sísmica y se conoce como sobreamortiguada; cuando  $\xi = 1$  (Línea b), la estructura busca de manera rápida volver a su posición de equilibrio y se conocer como críticamente amortiguadas, y por ultimo las estructuras subamortiguadas obtienen  $\xi < 1$  (línea c), ya que oscilan frente a su posición de equilibrio produciendo un aumento progresivo en la amplitud de vibración (Alarcón, Sergio, 2015).



**Figura 116.** Vibración en estructuras sobreamortiguada, críticamente amortiguadas y subamortiguadas  
**Fuente.** Manuel PLAXIS (Bentley, 2020)

A través del análisis modal obtenido de las modelaciones de cada uno de los pórticos implementados en el software de ETABS V19.0, se logró determinar los coeficientes de Rayleigh, con base en la solución de las Ecuaciones 8 y 9 para los dos primeros modos de vibración:

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1}{\omega_1^2\omega_2^2} \quad (10)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1}{\omega_1^2\omega_2^2} \quad (11)$$

Donde,

$\omega_1$  = Frecuencia angular para el modo de vibración 1 en rad/s

$\omega_2$  = Frecuencia angular para el modo de vibración 2 en rad/s

$\xi_i$  = Relación de amortiguamiento  $\xi_1 = \xi_2$

En la Tabla 41, se evidencian los coeficientes de amortiguamiento Rayleigh obtenidos para los elementos estructurales de los pórticos implementados en el análisis de interacción sísmica suelo estructura.

**Tabla 41.**

*Coeficientes tipo Rayleigh para los elementos estructurales*

Descripción del pórtico		Pórtico de dos niveles con cubierta en placa.	Pórtico de tres niveles con cubierta en placa.	Pórtico de cinco niveles con cubierta en placa.
<b>Modo de vibración 1</b>	$T_1$ (s)	0.12	0.287	0.57
	$f_1$ (Hz)	7.87	3.51	1.74
	$\omega_1$ (rad/s)	49.55	21.92	10.94
	$\xi_1$	0.05 (5%)	0.05 (5%)	0.05 (5%)
<b>Modo de vibración 2</b>	$T_2$ (s)	0.116	0.224	0.41
	$f_2$ (Hz)	8.59	4.47	2.45
	$\omega_2$ (rad/s)	59.97	28.09	15.98
	$\xi_2$	0.05 (5%)	0.05 (5%)	0.05 (5%)
<b>Rayleigh</b>	$\alpha$	2.58	1.23	0.64
	$\beta$	$9.66 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$3.72 \times 10^{-3}$

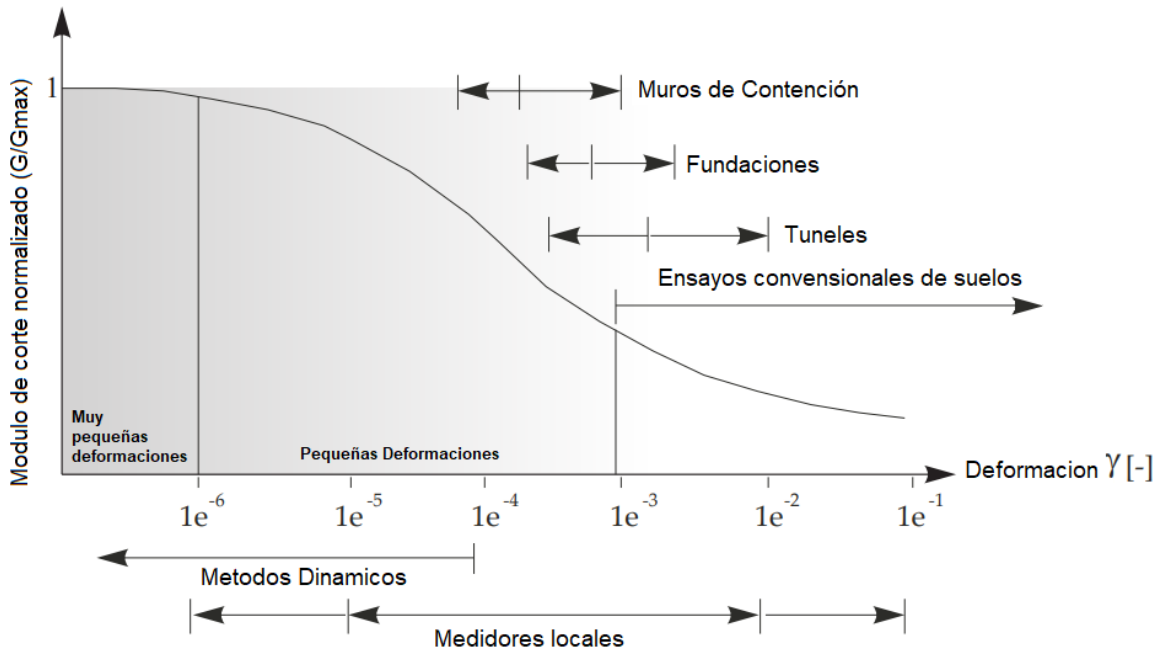
Fuente. Propia

## 8.2. Modelo constitutivo del suelo

La Figura 117, representa la degradación del módulo de corte normalizado ( $G/G_{max}$ ) con respecto al nivel de deformación ( $\gamma$ ). Al momento de evaluar las propiedades del suelo por medio de ensayos convencionales, parte de la información de la curva no es



contemplada ya que son medidos bajo valores de deformación mayores a  $10^{-3}$  donde el módulo de corte ha decrecido en aproximadamente un 50%. Por lo anterior, se hace necesario hacer uso de un modelo numérico que permita tener en cuenta la rigidez del suelo a deformaciones muy pequeñas y su comportamiento no lineal con respecto a los diferentes niveles de deformación.



**Figura 117.** Curva de degradación del módulo de corte con respecto a la deformación  
**Fuente.** Atkinson & Sallfors, 1991.

Para establecer las modelaciones en PLAXIS 2D, es necesario identificar el tipo de modelo constitutivo del suelo que reflejaría en mejor medida las propiedades de resistencia y rigidez, y que sea óptimo para el adecuado análisis por interacción sísmica suelo estructura. El modelo de endurecimiento del suelo con rigidez a pequeñas deformaciones “Hardening Soil Small”, permite identificar las propiedades avanzadas de rigidez y de resistencia de los suelos, donde la superficie de cedencia no es fija en el espacio de esfuerzos principales. Por lo anterior, puede expandirse de acuerdo con el cambio de las deformaciones plásticas y en función del esfuerzo de preconsolidación (Nieto, y otros, 2009).

### 8.2.1. Fundamento de la ley hiperbólica simple

De acuerdo con el manual de Plaxis 2D, con el paso de los años, la rigidez a pequeñas deformaciones ha sido estudiada, evidenciándose que los hallazgos de la dinámica de suelos no son aplicables en un análisis estático; principalmente por la naturaleza de la carga, más no por la magnitud de la deformación aplicada que se consideran más pequeñas en condiciones dinámicas (Excluyendo los terremotos). El modelo propuesto por Hardin & Drnevich (1972), es uno de los modelos más utilizados en la dinámica de suelos. En él, se establece que la curva de degradación del módulo de corte en función de la deformación (esfuerzo - deformación) para pequeñas deformaciones, se puede describir de manera adecuada mediante la ley hiperbólica simple, así:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|} \quad (12)$$

Donde,

$\frac{G}{G_{max}}$  = Relación entre el módulo de corte secante ( $G$ ) y el módulo de corte a muy pequeñas deformaciones (máximo)

$\gamma_r$  = Deformación Umbral de Corte =  $\frac{\tau_{max}}{G_{max}}$

$\tau_{max}$  = Esfuerzo cortante a la falla

$G_{max}$  = Módulo de corte máximo (deformaciones muy pequeñas)

Con el fin de evitar errores y hacer el procedimiento más sencillo, Santos & Correia (2001), sugirieron implementar la deformación Umbral de corte cuando el módulo secante ( $G$ ) alcance el 72.2% del módulo de corte máximo ( $G_{max}$ ). Por tal motivo, se obtuvo:

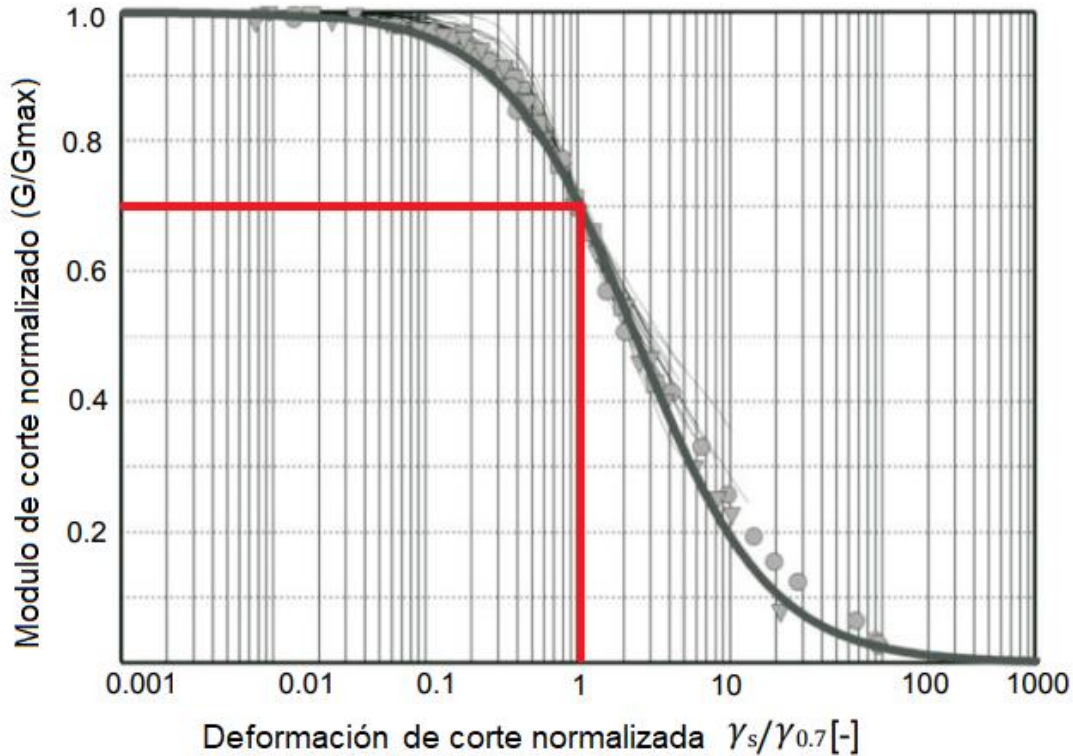
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \alpha \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.722}} \right|} \quad (13)$$

Donde,

$\gamma_r = \gamma_{0.7} =$  Deformación por cortante cuando  $G = 0.722G_{max}$

$\alpha =$  Constante = 0.385

En la Figura 118, se muestra los resultados obtenidos por Santos y Correa (2001) y su relación con la ley hiperbólica simple de Hardin y Drnevich (1972).



**Figura 118.** Curva de degradación del módulo con respecto a la rigidez normalizada  
**Fuente.** Santos & Correia (2001)

### 8.2.2. Relación de modelo Hardening Soil Small con la teoría de Hardin y Drnevich

A medida que un suelo sufre deformaciones se produce degradación de la rigidez principalmente por la pérdida de las fuerzas intermoleculares y superficiales en la estructura interna del suelo. Por lo anterior, Benz (2006), propuso una extensión multiaxial dependiente del historial de deformaciones de la teoría de Hardin y Drnevich, con el fin de aplicarlo al modelo Hardening soil.

El valor escalar de la deformación de corte  $\gamma$ , que ha sido aplicado secuencialmente en la ecuación de Hardin Drnevich, es igual a  $\frac{3}{2}\varepsilon_q$ . Sin embargo, Benz determinó que el valor escalar de una deformación cortante  $\gamma_{hist}$ , está en función del tensor simétrico que representa la historia de deformación desviadora del suelo y el incremento de deformación actual  $\Delta e$ , así:

$$\gamma_{hist} = \sqrt{3} \frac{\|H\Delta e\|}{\|\Delta e\|} \quad (14)$$

Donde,  $\|\dots\|$ , relaciona la normal Hilbert-Schmidt (operador lineal acotado).

El valor escalar de la deformación de corte  $\gamma_{hist} = \gamma$ , es aplicado secuencialmente en la ecuación de Hardin Drnevich (10), considerando siempre que  $\gamma = \frac{3}{2}\varepsilon_q$ . Ahora bien, la curva esfuerzo deformación se da en función del módulo de corte secante, por lo que realizando la derivada de la Ecuación 11 con respecto a la deformación, se obtiene el módulo tangente de corte, con la expresión que se evidencia a continuación:

$$G_t = \frac{G_o}{\left(1 + \alpha \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right| \right)^2} \quad (15)$$

Donde,

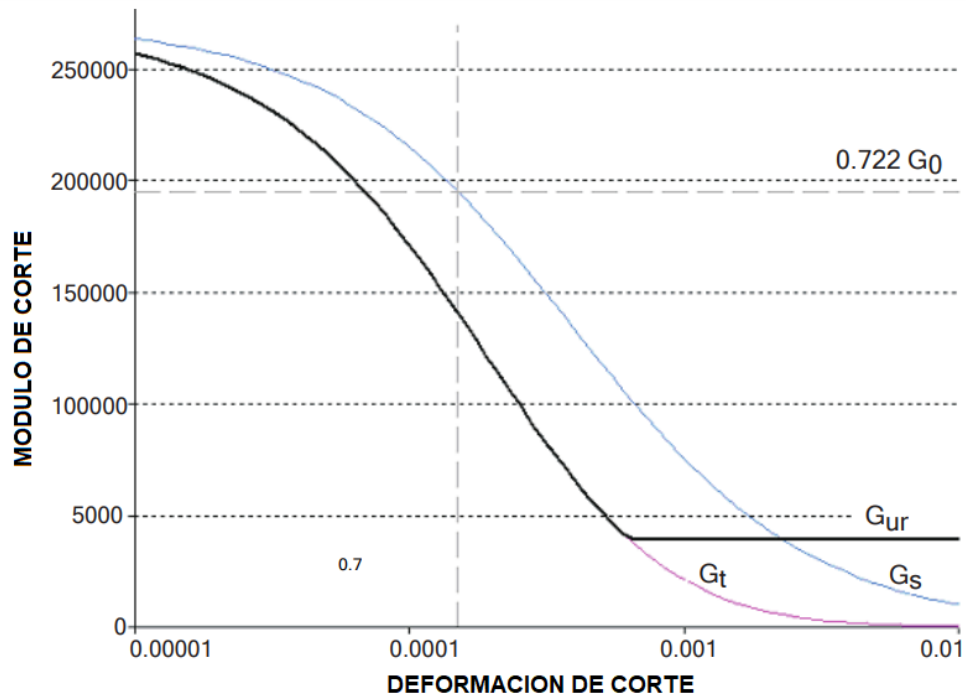
$G_t$  = Módulo de corte tangencial

La degradación del módulo de corte debido a las deformaciones plásticas en el modelo Hardening soil Small, se simula con el endurecimiento del suelo. La curva de degradación del módulo de corte está sujeta a un límite inferior que es determinado por ensayos de laboratorio convencionales.

Los valores inferiores del módulo de corte tangencial son introducidos a la rigidez de carga/descarga  $G_{ur}$ , apoyándose de los parámetros de módulo de Young  $E_{ur}$  y la relación de Poisson  $\nu_{ur}$ , mediante la Ecuación 13:

$$G_{ur} = \frac{E_{ur}}{2 + (1 + \nu_{ur})} \quad (16)$$

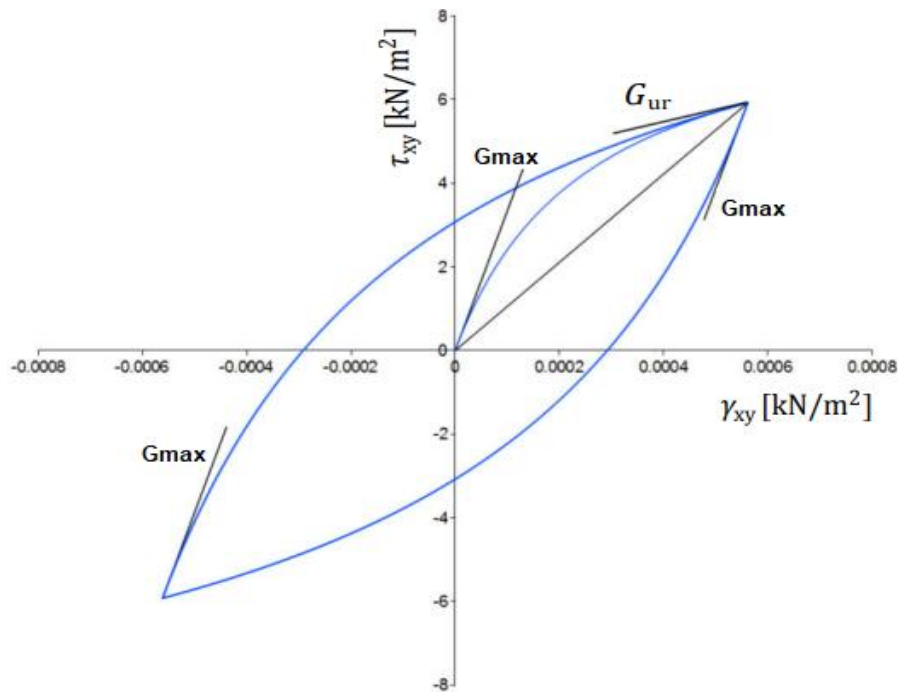
En la Figura 119, se muestra las curvas del modelo Hardening Soil Small (HSS) superpuestas sobre la propuesta por Hardin y Drnevich (1972).



**Figura 119.** Curva de degradación del módulo secante y tangencial del modelo HSS  
**Fuente.** Manuel PLAXIS (Bentley, 2020)

El modelo Hardening Soil Small (HSS), se caracteriza por:

1. Implementar la teoría de plasticidad en vez de la teoría de elasticidad.
2. Incluye la dilatancia del suelo.
3. No generar deformaciones acumuladas con múltiples ciclos de carga.
4. No generar presiones de poros acumuladas con comportamiento no drenado.
5. No generalizar el valor de la velocidad de onda de corte ya que cambian de acuerdo con la rigidez dependiente del esfuerzo.
6. La cantidad de amortiguamiento histérico está en función de las amplitudes de las deformación y cargas aplicadas
7. El máximo valor de amortiguamiento obtenido depende de la relación entre el módulo de corte máximo  $G_{max}$  y el Módulo de corte para descarga y recarga  $G_{ur}$ , tal y como se evidencia en la Figura 120.



**Figura 120.** Parámetros de resistencia para un ciclo de carga  
**Fuente.** Manuel PLAXIS (Bentley, 2020)

### 8.2.3. Propiedades estáticas y dinámicas de los suelos

El modelo Hardening Soil Small, hace uso de propiedades de rigidez, resistencia y algunas avanzadas que permiten establecer la información detallada del comportamiento estático y dinámico de cada uno de los estratos del suelo. Las propiedades básicas que se implementan en el modelo Hardening Soil Small, es el peso unitario de cada estrato de suelo ( $\gamma_{unitat}$ ), relación de vacíos inicial ( $e_{init}$ ) y los coeficientes de Amortiguamiento Rayleigh  $\alpha$  y  $\beta$ , que representan la afectación de la masa y la rigidez, respectivamente. Los parámetros de resistencia son los establecidos por el modelo de Mohr-Coulomb, tal y como se muestra en la Tabla 42.

**Tabla 42.**

*Parámetros de resistencia del modelo HSS*

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDAD
$c'$	cohesión (Esfuerzos efectivos)	kPa
$\varphi'$	Ángulo de Interacción (Esfuerzos efectivos)	°
$\psi$	Ángulo de dilatancia	°

**Fuente.** Propia, con base en lo establecido en el manual Plaxis 2D, 2020.

En la Figura 121, se muestra la interfaz del software Plaxis 2D y la tipología de propiedades requeridas como datos de entrada. Así mismo, en la Tabla 43 se describe cada una de las propiedades de rigidez que son implementadas en uso del modelo Hardening Soil Small.

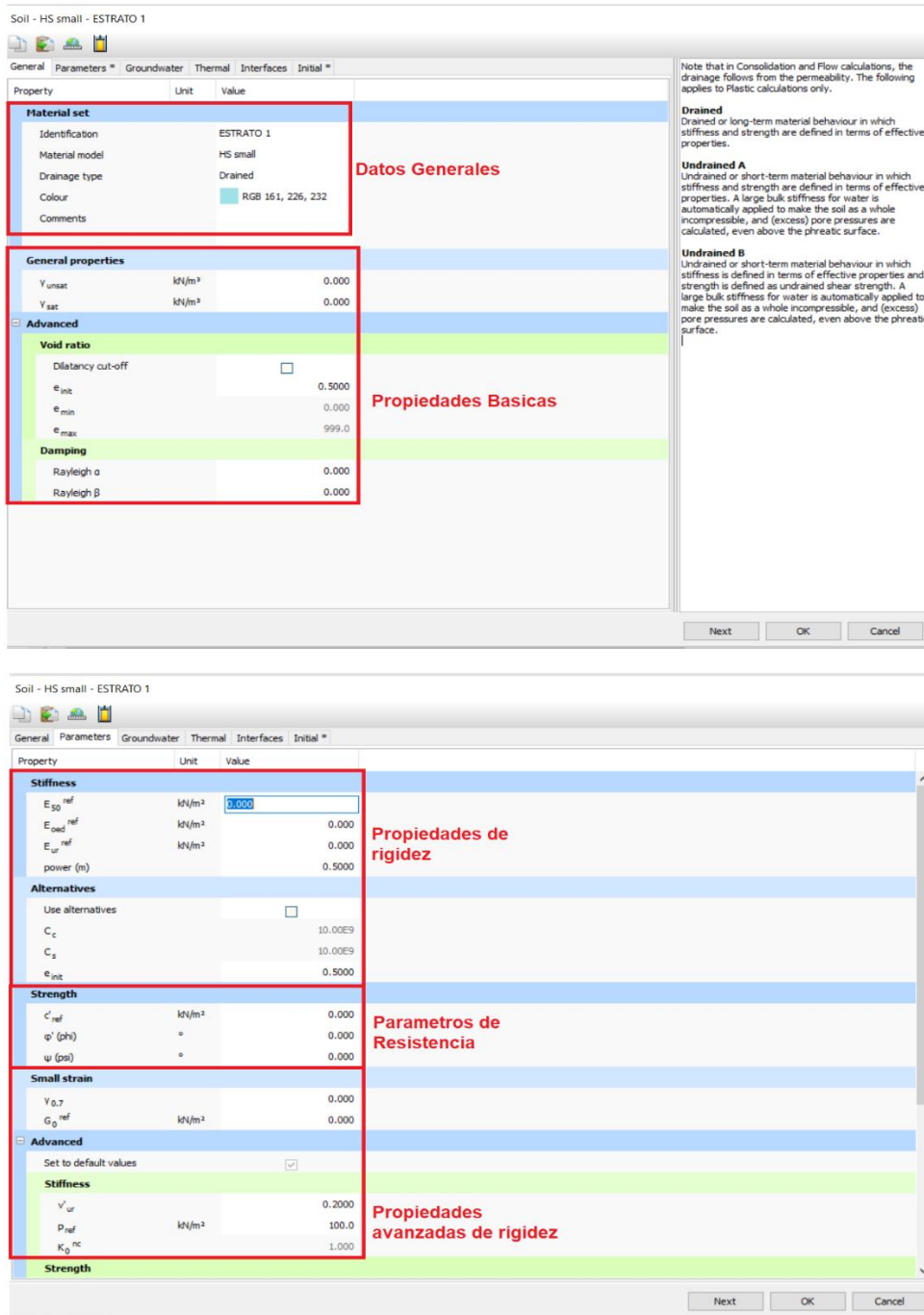


Figura 121. Interfaz de las propiedades de los suelos del software de elementos finitos Plaxis 2D Fuente. PLAXIS 2D V20.0, 2020.

**Tabla 43.**

*Propiedades básicas y avanzadas de rigidez del modelo HSS*

<b>SIMBOLO</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>UNIDAD</b>
$E_{50}^{ref}$	Módulo de Young de Referencia (carga triaxial)	kPa
$E_{oed}^{ref}$	Módulo de Young de Referencia (carga Edométrica)	kPa
$E_{ur}^{ref}$	Módulo de Young de Referencia (carga/descarga)	kPa
m	Nivel de dependencia tensional Rigidez /Esfuerzo (Poder)	-
$G_0^{ref}$	Módulo de corte para pequeñas deformaciones	kPa
$\nu_{ut}$	Relación de Poisson (Carga/Descarga)	-
$P_{ref}$	Presión de referencias = 100 kPa	kPa
$K_0^{nc}$	Coefficiente de presión de tierras NC ( $1 - \sin \varphi'$ )	-
$\gamma_{0.7}$	Nivel de deformación unitaria cuando el módulo de corte máximo se ha reducido al 72.2%	-

Fuente. Propia, con base en lo establecido en el manual Plaxis 2D, 2020.

### 8.3. Descripción de los perfiles de suelos

En los numerales 6.1 y 6.2, se establecieron los perfiles estratigráficos de los dos sitios de análisis. El primero se compone de 2.8m son Arcilla de baja plasticidad, seguido de 4m de arenas limos que son subyacidos por 14,7 m de arenas arcillosas. El segundo sitio de análisis se conforma de 40m de profundidad, principalmente por 1.5m de arcillas de baja plasticidad, 2m de arcilla de alta plasticidad y luego siguen 36,5 m de arenas arcillosas. En las tablas 44 y 45 se muestra los perfiles estratigráficos de los sitios de análisis 1 y 2, respectivamente.

**Tabla 44.**

*Perfil estratigráfico general del sitio de análisis 1*

<b>Capa</b>	<b>Desde</b>	<b>Hasta</b>	<b>Espesor</b>	<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Descripción</b>
	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>S.U.C. S</b>	
<b>1</b>	0	1.8	1.8	CL	Arcilla gris oscura de consistencia muy dura
<b>2</b>	1.8	2.8	1	CL	
<b>3</b>	2.8	4.7	1.9	SM	Arena limo arcillosas de color café con gravas, densidad muy compacta
<b>4</b>	4.7	6.8	2.1	SM	
<b>5</b>	6.8	9.1	2.3	SC	Gravas en matriz arcillosa y arenosas de color café, densidad muy compacta
<b>6</b>	9.1	12	2.9	SC	
<b>7</b>	12	21.5	9.5	SC	

Fuente. Propia



**Tabla 45.***Perfil estratigráfico general del sitio de análisis 2*

Capa	Desde	Hasta	Espesor m	Tipo de Suelo	Descripción
	m	m		S.U.C. S	
1	0	1	1	CL	Arcilla arenosa de color café de consistencia muy dura
2	1	1.5	0.5	CL	
3	1.5	3.5	2	CH	Arcilla de color café con vetas de óxido y gravas gruesas de consistencia muy dura
4	3.5	7.5	4	SC	Arena arcillosa de café con gravas de densidad muy compacta
5	7.5	8.8	1.3	SC	
6	8.8	25	16.2	SC	Gravas en matriz arcillosa y arenosas de color café, densidad muy compacta
7	25	40	15	SC	

Fuente. Propia

**8.3.1. Determinación de propiedades básicas de los suelos**

Para la determinación de las propiedades básicas de los suelos, se hizo uso de la información registrada en el capítulo IV, principalmente para los valores de los pesos unitarios. En la Tabla 46, se muestran los valores para cada estrato de suelo de los dos sitios de análisis.

**Tabla 46.***Pesos unitarios de los estratos de suelos*

Estrato	Espesor (m)		Espesor m	Peso unitario ( $kN/m^3$ )
	De	Hasta		
<b>Sitio de análisis 1</b>				
1	0	1.8	1.8	17.26
2	1.8	2.8	1	17.26
3	2.8	4.7	1.9	18.64
4	4.7	6.8	2.1	18.64
5	6.8	9.1	2.3	19.62
6	9.1	12	2.9	19.62
7	12	21.5	9.5	19.62
<b>Sitio de análisis 2</b>				
1	0	1	1	19.31
2	1	1.5	0.5	20.23
3	1.5	3.5	2	21.32
4	3.5	7.5	4	21.32
5	7.5	8.8	1.3	21.32
6	8.8	25	16.2	21.32
7	25	40	15	21.32

Fuente. Propia

Los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh fueron obtenidos mediante la determinación previa de los Periodos de vibración natural del suelo ( $T_s$ ) de cada uno de los estratos, las frecuencias de vibración ( $f$ ), las frecuencias angulares ( $\omega$ ), la razón de amortiguamiento ( $\xi$ ). Lo anterior con base en lo establecido en el numeral 7.1.4 del Capítulo VII. Ahora bien, los periodos de vibración natural de cada uno de los estratos que fueron determinados mediante el método japonés; el cual, depende de la velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) y del espesor del estrato de suelo hasta la roca (ecuación 17). Posteriormente, se determinó la frecuencia natural de vibración ( $f_1$ ) la cual es inversamente proporcional al periodo de vibración natural, y la frecuencia angular de vibración ( $\omega_1$ ), mediante las ecuaciones 18 y 19.

<b>Periodo de vibración natural</b>	<b>Frecuencia de vibración natural</b>	<b>Frecuencia angular</b>
$T_s = 4 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Si}} \quad (17)$	$f_1 = \frac{1}{T_s} \quad (18)$	$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (19)$

La frecuencia angular ( $\omega_2$ ), fue determinada siguiendo lo recomendado por Hudson, Idriss & Beirkae (1994); para ello, se obtuvo, la frecuencia de vibración ( $f_2$ ), que se encuentra en función de la frecuencia predominante del sismo ( $f_p$ ). Lo anterior, siguiendo lo dado en las Ecuaciones 20, 21 y 22. Ahora bien, la razón de amortiguamiento ( $\xi$ ), se obtuvo mediante lo relacionado en el Numeral 7.1.4 del Capítulo VII, determinando el decremento logarítmico ( $\delta$ ) para las señales vibratorias amortiguadas, al nivel de cada estrato del suelo (ver Ecuaciones 23 y 24).

<b>Frecuencia predominante del sismo</b>	<b>Frecuencia de vibración</b>	<b>Frecuencia angular</b>
$f_p = \frac{1}{T_p} \quad (20)$	$f_2 = \frac{f_p}{f_1} \quad (21)$	$\omega_2 = 2\pi f_2 \quad (22)$
<b>Decremento logarítmico</b>		<b>Razón de amortiguamiento</b>
$\delta = \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (23)$		$\xi = \frac{\delta}{2\pi} \quad (24)$

*donde  $A_i$  = Amplitud*

Adicional a lo anterior, se realizó el cálculo de los coeficientes de amortiguamiento Rayleigh para cada sitio de análisis. Con el fin de simplificar el número de datos, se trabajó con los resultados promedios, ver tablas 47 y 48.

**Tabla 47.**

*Coefficiente de amortiguamiento Rayleigh – Sitio de análisis 1*

<b>Estrato</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>S.U.C.S</b>	CL	CL	SM	SM	SC	SC	SC
<b>Espesor (m)</b>	1.8	1	1.9	2.1	2.3	2.9	9.5
$V_s$ (m/s)	252	284	230	188	310	388	416
$T_s$ (s)	0.27	0.24	0.23	0.19	0.151	0.12	0.09
$f_1$ (Hz)	3.69	4.12	4.37	5.11	6.63	8.25	10.95
$\omega_1$ (rad/s)	23.16	25.89	27.48	32.12	41.63	51.82	68.78
$f_2$ (Hz)	1.01	0.90	0.85	0.73	0.56	0.45	0.34
$\omega_2$ (rad/s)	6.34	5.67	5.34	4.57	3.53	2.83	2.13
$\delta$	1.50	1.50	1.63	1.63	1.21	1.21	1.21
$\xi$	0.24	0.24	0.26	0.26	0.19	0.19	0.19
$\alpha$	2.38	2.22	2.32	2.07	1.25	1.04	0.80
$\beta$	0.016	0.015	0.015	0.014	0.008	0.007	0.005

Fuente. Propia

**Tabla 48.**

*Coefficiente de amortiguamiento Rayleigh – Sitio de análisis 2*

<b>Estrato</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>S.U.C.S</b>	CL	CL	CH	SC	SC	SC	SC
<b>Espesor (m)</b>	1	0.5	2	4	1.3	16.2	15
$V_s$ (m/s)	387.85	387.85	387.85	387.85	387.85	520.48	608.07
$T_s$ (s)	0.31	0.304	0.30	0.28	0.24	0.22	0.10
$f_1$ (Hz)	3.19	3.29	3.35	3.60	4.23	4.48	10.13
$\omega_1$ (rad/s)	20.01	20.69	21.05	22.61	26.56	28.15	63.68
$f_2$ (Hz)	0.92	0.88	0.87	0.79	0.64	0.59	0.12
$\omega_2$ (rad/s)	5.80	5.56	5.44	4.95	3.99	3.68	0.77
$\delta$	0.87	0.87	0.87	1.42	1.28	1.12	1.12
$\xi$	0.14	0.14	0.14	0.23	0.20	0.18	0.18
$\alpha$	1.25	1.22	1.20	1.84	1.30	1.05	0.24
$\beta$	0.046	0.048	0.049	0.087	0.098	0.093	0.446

Fuente. Propia

### 8.3.2. Identificación de propiedades de resistencia de los suelos

En la Tabla 49, se muestran los parámetros de resistencia de cada uno de los estratos de suelo. De acuerdo con, los resultados de los ensayos de laboratorio y la información geotécnica detallada en el Capítulo IV.

**Tabla 49.**

*Parámetros de resistencia de los suelos – Sitio de análisis 1 y 2*

<b>Sitio de análisis 1</b>	<b>Estrato</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	<b>S.U.C.S</b>	CL	CL	SM	SM	SC	SC	SC
	<b>C' (kPa)</b>	20	20	15	10	-	-	-
	<b><math>\varphi</math> (°)</b>	18	15	24	26	35	35	35
	<b><math>\psi</math> (°)</b>	0	0	0	0	5	5	5
	<b><math>\nu</math></b>	0.35	0.350	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
<b>Sitio de análisis 2</b>	<b>Estrato</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	<b>S.U.C.S</b>	CL	CL	CH	SC	SC	SC	SC
	<b>C' (kPa)</b>	20	20	20	-	-	-	-
	<b><math>\varphi</math> (°)</b>	18	15	10	30	35	35	35
	<b><math>\psi</math> (°)</b>	0	0	0	0	5	5	5
	<b><math>\nu</math></b>	0.35	0.35	0.35	0.3	0.3	0.3	0.3

Fuente. Propia

### 8.3.3. Propiedades de rigidez de los suelos

Las propiedades de rigidez de los suelos que constituyen cada uno de los sitios de análisis, fueron determinados de la siguiente manera:

#### 8.3.3.1. Módulos de Young $E_{50}^{ref}$ , $E_{oed}^{ref}$ y $E_{ur}^{ref}$

El manual de Plaxis 2D estableció la comparación de los resultados de múltiples ensayos a muestras de arenas sueltas y densas realizados por la Universidad Joseph Fourier y los resultados del comportamiento del Modelo Hardening Soil; con la finalidad de obtener valores del Módulo de Young de referencia para carga triaxial. Frente a esto, se

evidenció, que para arenas densas con pesos unitarios de 17-19  $kN/m^3$ , el módulo de Young de referencia es igual a 37000 kPa. Con lo anterior, se estableció el  $E_{50}^{ref}$  para cada estrato de suelo teniendo en cuenta que es proporcional a la velocidad de onda de corte del suelo ( $V_s$ ).

Ahora bien, los módulos de Young para carga Edométrica y carga/descarga, se calcularon mediante lo recomendado en el manual de Plaxis 2D, respectivamente, tal y como se evidencia en las Ecuaciones 25 y 26:

**Módulo de Young de Referencia  
(carga Edométrica)**

$$\frac{E_{50}^{ref}}{1.25} = E_{oed}^{ref} \quad (25)$$

**Módulo de Young de Referencia  
(carga/descarga)**

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} \quad (26)$$

### 8.3.3.2. *Módulo de corte de referencia para pequeñas deformaciones*

El módulo de corte para pequeñas deformaciones  $G_o^{ref}$  se determinó obteniendo el 72.2% del máximo de corte  $G_{max}$ , de la siguiente forma:

$$G_o^{ref} = 0.722 G_{max} = 0.722 V_s^2 \rho \quad (27)$$

Donde,

$V_s$  = Velocidad de onda corte (m/s)

$\rho$  = Densidad del suelo ( $Ton/m^3$ )

### 8.3.3.3. *Nivel de dependencia tensional Rigidez /Esfuerzo (m)*

El manual de Plaxis 2D recomienda un valor entre 0.5 a 1.0 para el nivel de dependen tensional Rigidez/Esfuerzo (m).

### 8.3.3.4. Nivel de deformación unitario $\gamma_{0.7}$

El nivel de deformación unitaria se determinó haciendo uso de las curvas de degradación del módulo de corte para cada uno de los estratos de suelos establecidos en el Capítulo VII. Para tal caso, se toma el valor de la deformación cuando el  $\frac{G}{G_{max}} \approx 0.722$ , tal y como se evidencia en la Figura 122.

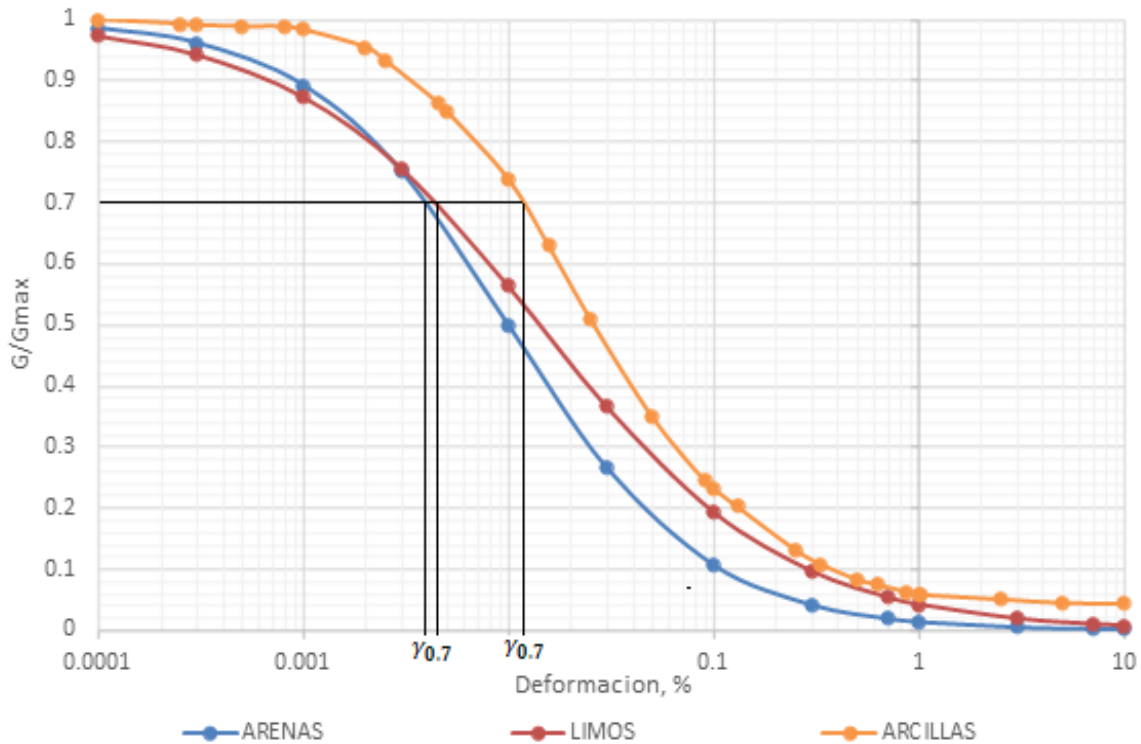


Figura 122. Nivel de deformación unitaria  $\gamma_{0.7}$   
Fuente. Propia.

En la Tabla 50, se muestran los resultados del módulo de corte de referencia para pequeñas deformaciones para cada uno de los estratos de suelos que constituyen los sitios de análisis.

**Tabla 50.**

*Propiedades de rigidez básicas y avanzadas – sitios de análisis*

<b>Sitio de análisis 1</b>								
<b>Estrato</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>S.U.CS</b>		CL	CL	SM	SM	SC	SC	SC
<b>Desde</b>	<b>m</b>	0	1.8	2.8	4.7	6.8	9.1	12
<b>Hasta</b>	<b>m</b>	1.8	2.8	4.7	6.8	9.1	12	21.5
<b>Espesor</b>	<b>m</b>	1.8	1	1.9	2.1	2.3	2.9	9.5
<b>Vs (m/s)</b>		252	284	230	188	310	388	416
<b>Y (kN/m<sup>3</sup>)</b>		17.6	17.6	19.0	19.0	20.0	20.0	20.0
<b>E<sub>50</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		22413.5	25259.6	20456.7	16721.2	27572.1	34509.6	37000
<b>E<sub>oed</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		17930.8	20207.7	16365.4	13376.9	22057.7	27607.7	29600
<b>E<sub>ur</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		67240.4	75778.8	61370.2	50163.5	82716.3	103528.8	111000
<b>G<sub>max</sub> (kPa)</b>		111767.0	141954.5	100510	67153.6	192200	301088	346112
<b>G<sub>o</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		80695.8	102491.2	72568.2	48484.9	138768.4	217385.5	249892.9
<b>γ<sub>0.7</sub> (%)</b>		0.0141	0.0050	0.0055	0.0058	0.0065	0.0070	0.0080
<b>Sitio de análisis 2</b>								
<b>Estrato</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>S.U.CS</b>		CL	CL	CH	SC	SC	SC	SC
<b>Desde</b>	<b>m</b>	0	1	1.5	3.5	7.5	8.8	25
<b>Hasta</b>	<b>m</b>	1	1.5	3.5	7.5	8.8	25	30
<b>Espesor</b>	<b>m</b>	1	0.5	2	4	1.3	16.2	5
<b>Vs (m/s)</b>		387.85	387.85	387.85	387.85	387.85	520.48	608.07
<b>Y (kN/m<sup>3</sup>)</b>		19.7	20.6	21.7	21.7	21.7	21.7	21.7
<b>E<sub>50</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		23600	23600	23600	23600	23600	31670.3	37000
<b>E<sub>oed</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		18880	18880	18880	18880	18880	25336.2	29600
<b>E<sub>ur</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		70800	70800	70800	70800	70800	95010.9	111000
<b>G<sub>max</sub> (kPa)</b>		296132.3	310209.1	326892.6	326892.6	326892.6	588688.5	803497.6
<b>G<sub>o</sub><sup>ref</sup> (kPa)</b>		213807.5	223970.9	236016.4	236016.4	236016.4	425033.1	580125.3
<b>γ<sub>0.7</sub> (%)</b>		0.0140	0.0140	0.0130	0.0055	0.0065	0.0083	0.0110

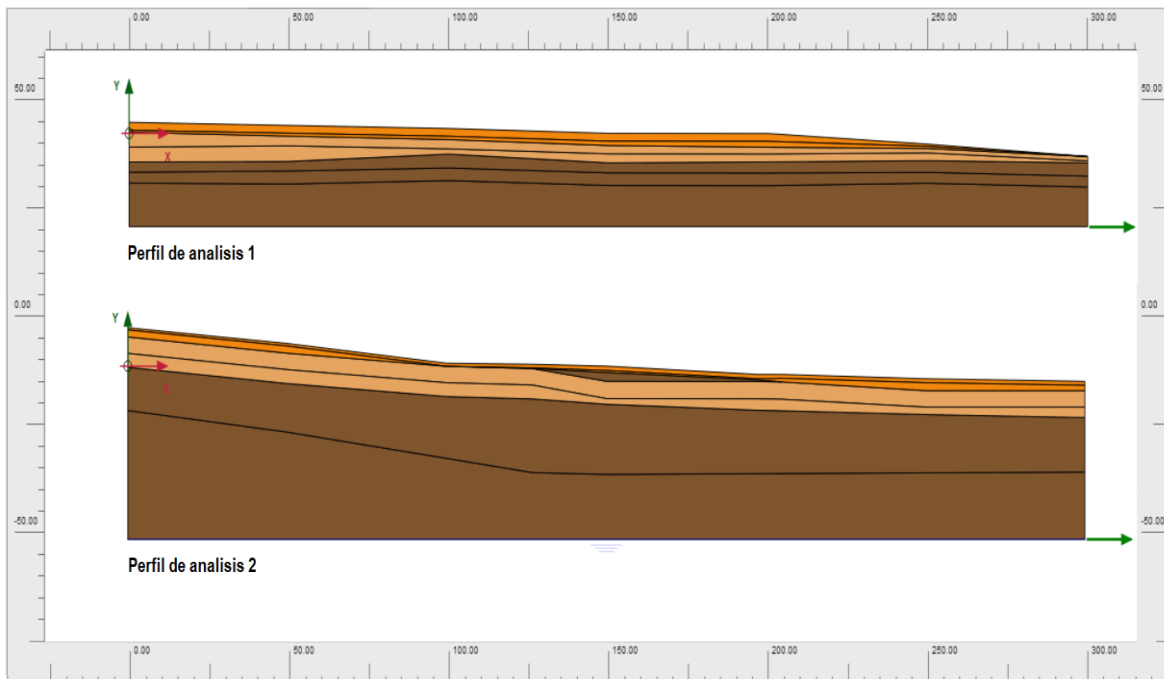
Fuente. Propia

#### **8.4. Modelación en Plaxis 2D**

El software bidimensional de análisis utiliza una interfaz visual, que permite detallar los componentes del modelo, indexando las propiedades mecánicas y dinámicas de los suelos y de las estructuras y los acelerogramas de la amenaza sísmica. Con la finalidad de evitar alteraciones en la respuesta por efectos de frontera, se establecieron longitudes horizontales de 300m, lo que corresponde a una relación aproximada de 1/10.

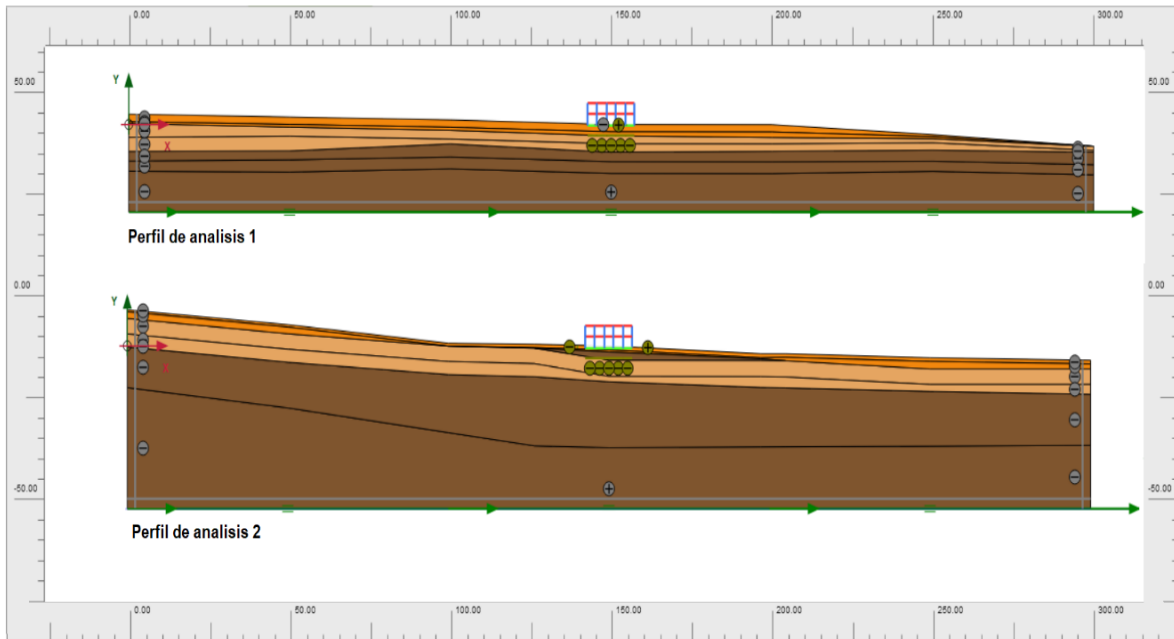
### 8.4.1. Ventana grafica – Perfiles geotécnicos

La Figura 123 muestra la ventana grafica de los perfiles de los sitios de análisis, cada uno con 300m de longitud, y profundidades de 21m hasta 23.54m para el sitio de análisis 1 y de 40m a 48.86m para el sitio de análisis 2. En la Figura 124 se evidencia los perfiles de análisis 1 y 2, respectivamente con la modelación de los elementos tipo “PLATE” de vigas, columnas, losas y vigas de cimentación del pórtico para la edificación de 2 niveles. Ahora bien, la Figura 125 corresponde al perfil estratigráfico del sitio de análisis 1 con la modelación de los elementos estructurales del pórtico de la edificación de 3 niveles. Por último, la Figura 126 muestra la modelación de los elementos estructurales de la edificación de 5 niveles sobre el perfil estratigráfico del sitio de análisis 2.

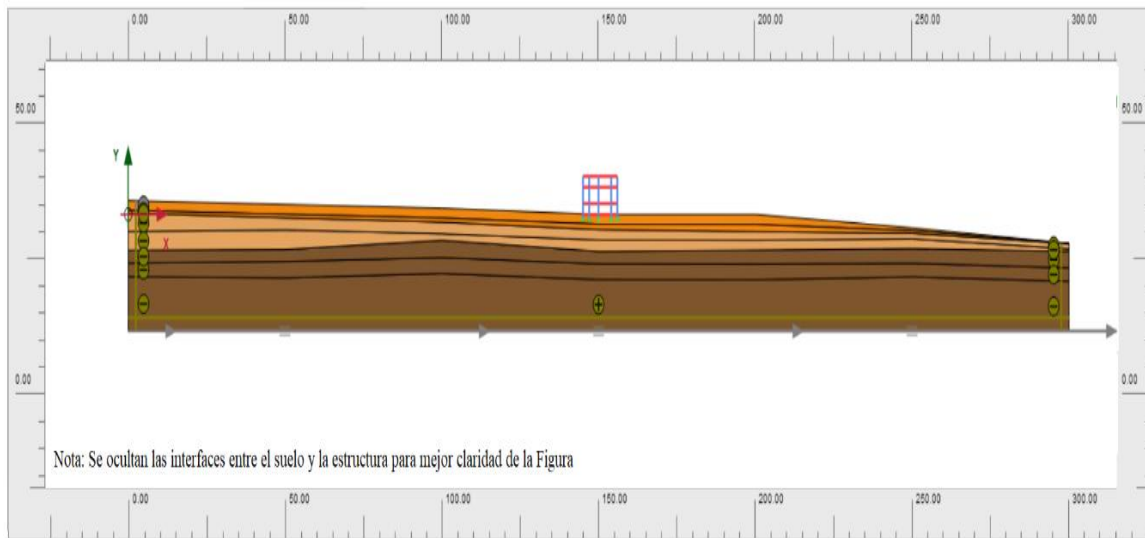


**Figura 123.** Ventana grafica – Perfil de análisis 1  
**Fuente.** Software Plaxis 2D, 2020.

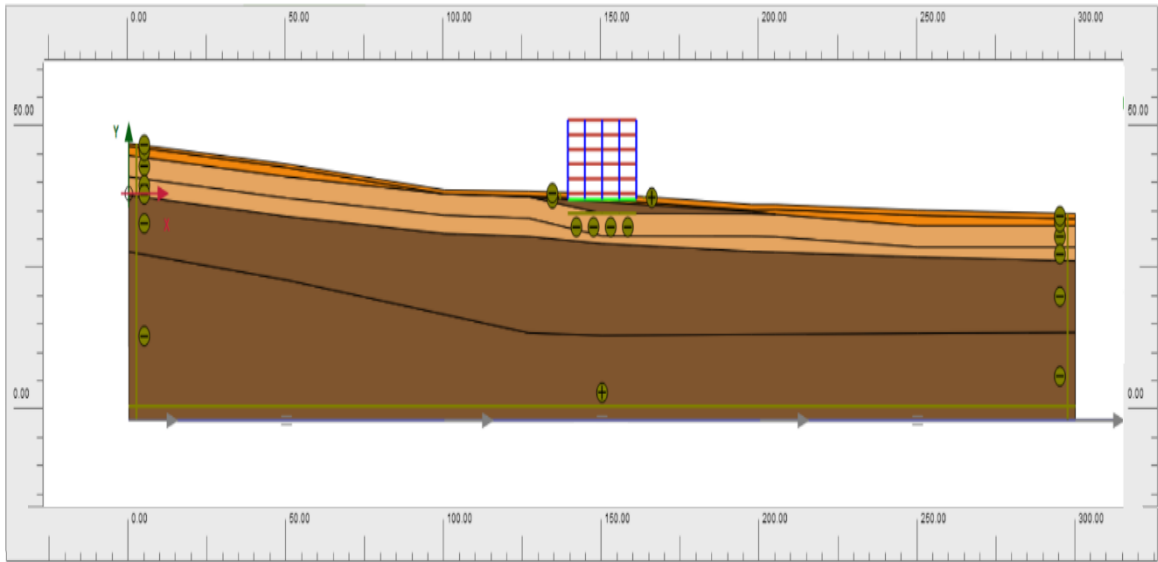




**Figura 124.** Perfiles de análisis + Edificación de 2 niveles y cubierta en placa  
**Fuente.** Ventana gráfica, software Plaxis 2D, 2020.



**Figura 125.** Perfil de análisis 1 + Edificación de 3 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Ventana gráfica, software Plaxis 2D, 2020.



**Figura 126.** Perfil de análisis 2 + Edificación de 5 niveles con cubierta en placa  
**Fuente.** Ventana gráfica, software Plaxis 2D, 2020

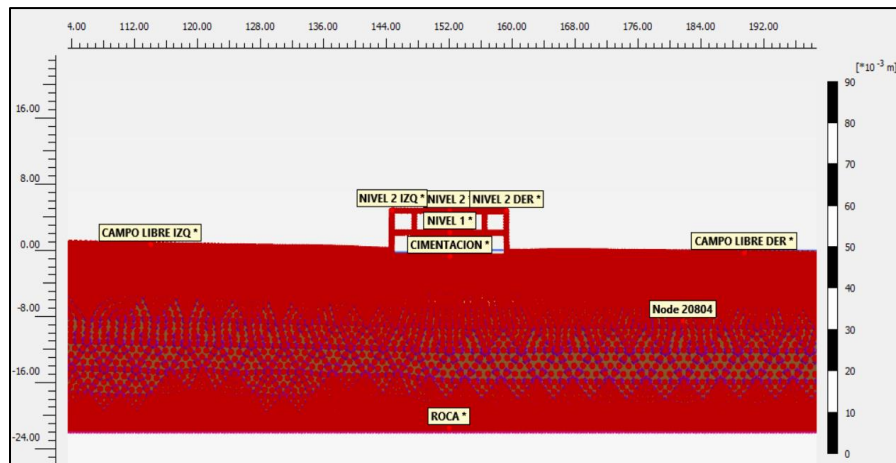
## Capítulo IX

### Análisis de Resultados

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados entregados en cada una de las cuatro modelaciones bidimensionales a través de software de elementos finitos Plaxis 2D en las cuales se contempló análisis en campo libre y con la inclusión de las edificaciones detalladas en el Capítulo VIII.

#### 9.1. Sitio de análisis No. 1 – Campo Libre

Como primera medida se realizó la comparación de los espectros de respuesta sísmica en campo libre arrojados por el análisis lineal equivalente 1D para cada uno de los nueve escenarios considerados y las modelaciones bidimensionales realizadas en el software de elementos finitos Plaxis 2D V20. Este último, mediante la toma de dos puntos retirados 30m de la estructura y a 112m de las fronteras de la modelación, con la finalidad de evitar alteraciones en los resultados por efectos de frontera. En la Figura 127 se evidencia la ubicación de los puntos de análisis en campo libre analizados.



**Figura 127.** Perfil de análisis 1 + Puntos de análisis en campo libre  
**Fuente.** Ventana gráfica, software Plaxis 2D, 2020.

Las figuras 128 y 129 muestra el espectro de respuesta de la media de los datos, el espectro de diseño dado por la NSR-10 para un perfil de suelo tipo C y los datos en las microzonificaciones sísmicas de la ciudad de Ibagué de los años 2006 y 2020; los cuales, son superpuestos por los espectros de respuesta en campo libre obtenidos de las modelaciones bidimensionales en plaxis 2D. La aceleración espectral para un periodo de

0s en la superficie de campo libre se encuentran en valores de 0,22g y 0,26g para la amenaza sísmica cortical y 0,17g y 0,24g para la amenaza sísmica intraplaca. Aunque cada uno de los espectros de respuesta fueron obtenidos bajo consideraciones distintas, se observa similitud en las aceleraciones espectrales iniciales. Lo anterior indica, que la aceleración espectral para periodo 0s es de 0.28g para amenaza cortical y 0.25g para amenaza interplaca, tal y como se observa en la Tabla 51.

**Tabla 51.**

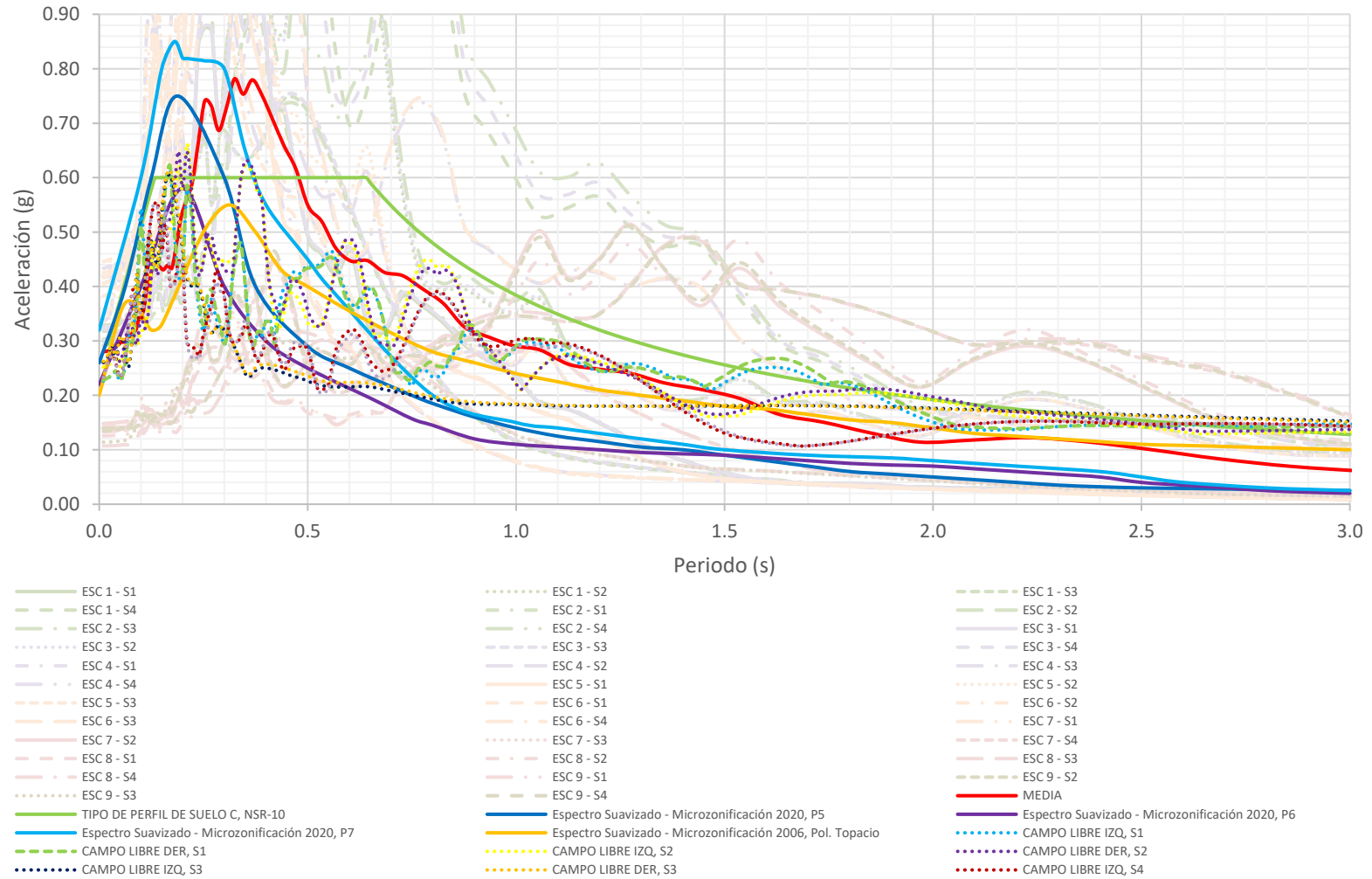
*Aceleraciones espectrales en periodos 0s de distintos espectros de respuesta – sitio de análisis 1*

ESPECTRO	Sa (g)	
	CORTICAL	INTRAPLACA
Tipo de Suelo C, NSR-10		0.24
Espectro suavizado – microzonificación 2006, Pol. topacio		0.20
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P5		0.26
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P6		0.22
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P7		0.32
Campo libre analisis unidimensional	0.28	0.25
Campo libre analisis bidimensional	0.22 – 0.26	0.17 - 0.24

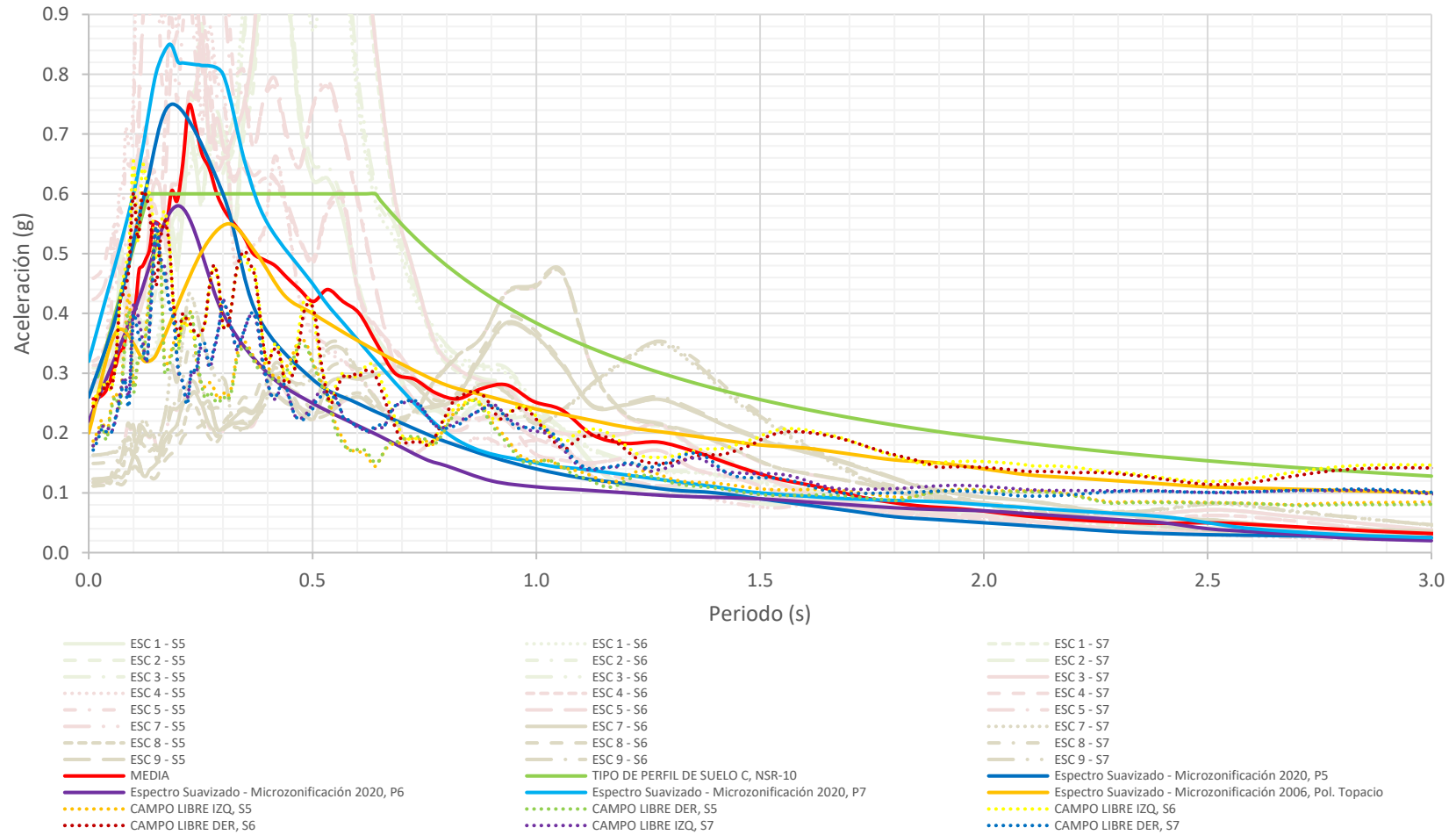
Fuente. Propia

Para la amenaza cortical mostrada en la Figura 128, las maximas aceleraciones espectrales arrojadas por el análisis bidimensional oscilan entre los valores de 0.55g y 0.66g presentes en entre los periodos de 0,15s y 0,35s, conservando similitud con el espectro de respuesta de la microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué del año 2006 y 2020. Entre los periodos de 0,60s y 0,85s alcanzan aceleraciones entre 0.42g y 0.48g, asemejandose a las aceleraciones de la media de datos de los espectros de aceleraciones obtenidos en las modelaciones unidimensionales. Las aceleraciones espectrales arrojadas en la modelación bidimensional se encuentran por debajo del espectro de diseño para el suelo tipo C de la NSR-10. Sin embargo, a periodos de 0.15s - 0.2s y 0.32s - 0.36s las aceleraciones son superiores mostrando valores entre 0.6g a 0.66g.

Frente a la amenaza sísmica intraplaca las aceleraciones espectrales se encuentran entre los valores de 0.40g y 0.60g para periodos de vibración de 0.1s a 0.5s. Conservan un comportamiento similar hasta 0.15s con las dadas en la microzonificación sísmica de Ibagué del año 2020 para el P5 y para periodos superiores con las dadas en la microzonificación sísmica de Ibagué del año 2006 (ver Figura 129). Los periodos en los cuales se presentan las mayores aceleraciones espectrales tanto para la amenaza cortical como para la intraplaca, se encuentran entre 0.1s y 0.5s. Los periodos anteriormente mencionados, se asemejan a los periodos fundamentales de las edificaciones de hasta 5 niveles.

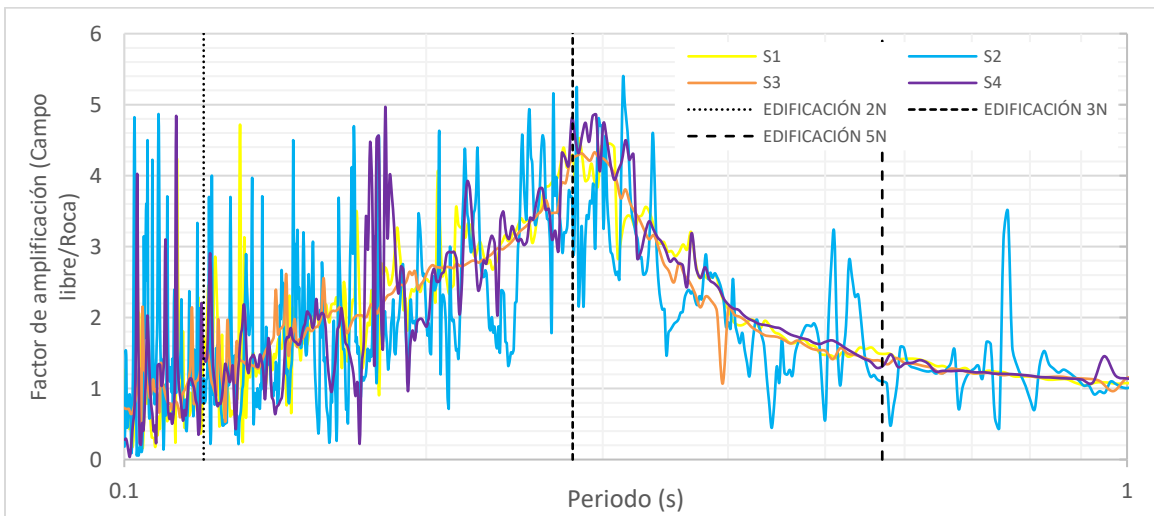


**Figura 128.** Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P5, P6 y P7), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos corticales – Sitio de análisis 1  
**Fuente.** Propia, apoyándose de los resultados arrojados por el software Plaxis 2D

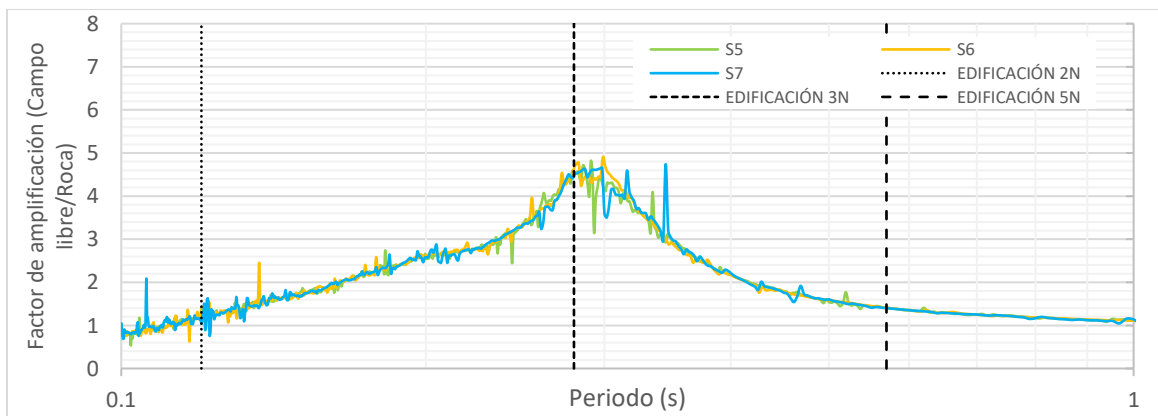


**Figura 129.** Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P5, P6 y P7), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos intraplaca – Sitio de análisis 1  
**Fuente.** Propia, apoyándose de los resultados arrojados por el software Plaxis 2D

Con base en las curvas de transferencia del sitio de análisis 1 mostradas en la Figura 130, se evidencia que para las fuentes sísmicas corticales (a), los máximos factores de amplificación se presentan en periodos de hasta 0.35s con amplificaciones de hasta 5.4. Además, en los periodos de 0.51s, 0.53s y 0.76s se generan amplificaciones de hasta 3.6. Por otro lado, para las fuentes sísmicas intraplaca (b), el máximo factor de amplificación es de 4.8 y se presenta entre los periodos de vibración de 0.3s a 0.35s. Dado lo anterior, se establece, que frente a la amenaza cortical las máximas amplificaciones se presentan en los periodos de vibración de edificaciones de 1 a 4 niveles. Ahora bien, para eventos sísmicos intraplaca se presentan en los periodos de vibración de edificaciones de 3 a 5 niveles.



(a)

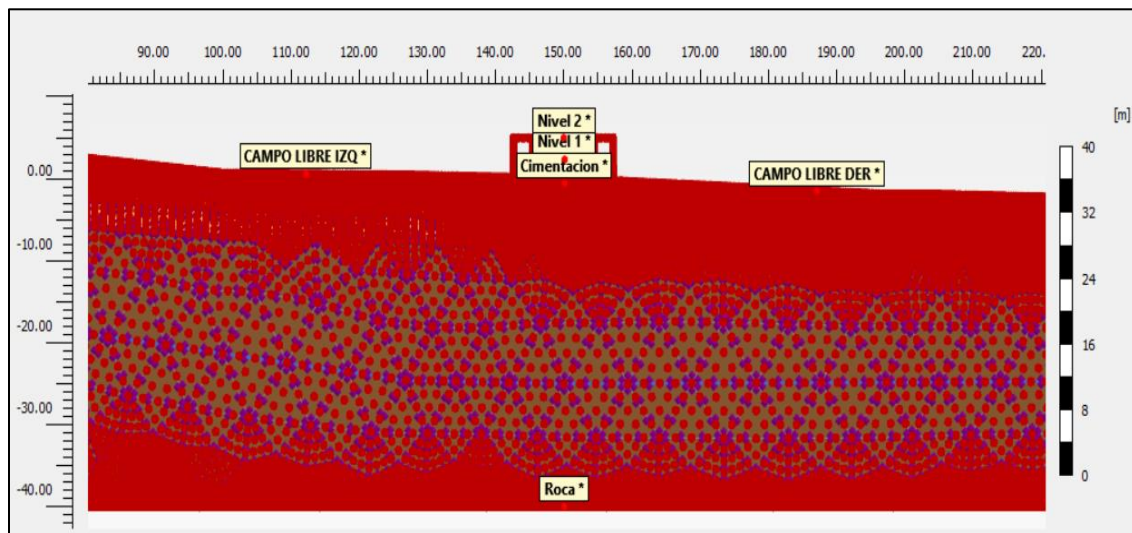


(b)

**Figura 130.** Curvas de transferencia (Factores de amplificación) (a) Fuentes sísmicas corticales (b) Fuentes sísmicas intraplaca – Sitio de análisis 1  
Fuente. Propia

## 9.2. Sitio de análisis No. 2 – Campo Libre

Tal y como se mencionó en el numeral anterior, se realizó la comparación de los espectros de respuesta en campo libre arrojados por el análisis lineal equivalente 1D y las modelaciones bidimensionales realizadas en el software de elementos finitos Plaxis 2D V20. Además, se estableció la comparación frente a los espectros de respuesta arrojados en la Microzonificación del año 2006 y 2020 (P0, P3 y P5) y el espectro de respuesta para un suelo tipo C dado por la NSR-10. En la Figura 131 se muestra la ubicación de los puntos analizados en campo libre para el sitio de análisis 2.



**Figura 131.** Perfil de análisis 2 + Puntos de análisis en campo libre  
**Fuente.** Ventana gráfica, software Plaxis 2D, 2020.

La Figura 132 muestra que para la amenaza cortical, las aceleraciones espectrales en periodos de 0s varían entre 0.17g a 0.24g mostrando similitud con las dadas en los espectros de respuesta la microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué de los años 2006 (Col. Champagnat) y 2020 (P0, P3 y P5). Por otro lado, para la amenaza intraplaca mostrada en la Figura 133, los valores de aceleraciones iniciales van desde 0.16g a 0.19g, valores cercanos a los arrojados en la respuesta sísmica de la microzonificación sísmica de la ciudad de Ibagué del año 2006. La Tabla 52 refleja los valores de aceleraciones espectrales en periodos 0s para los diferentes espectros de respuesta.

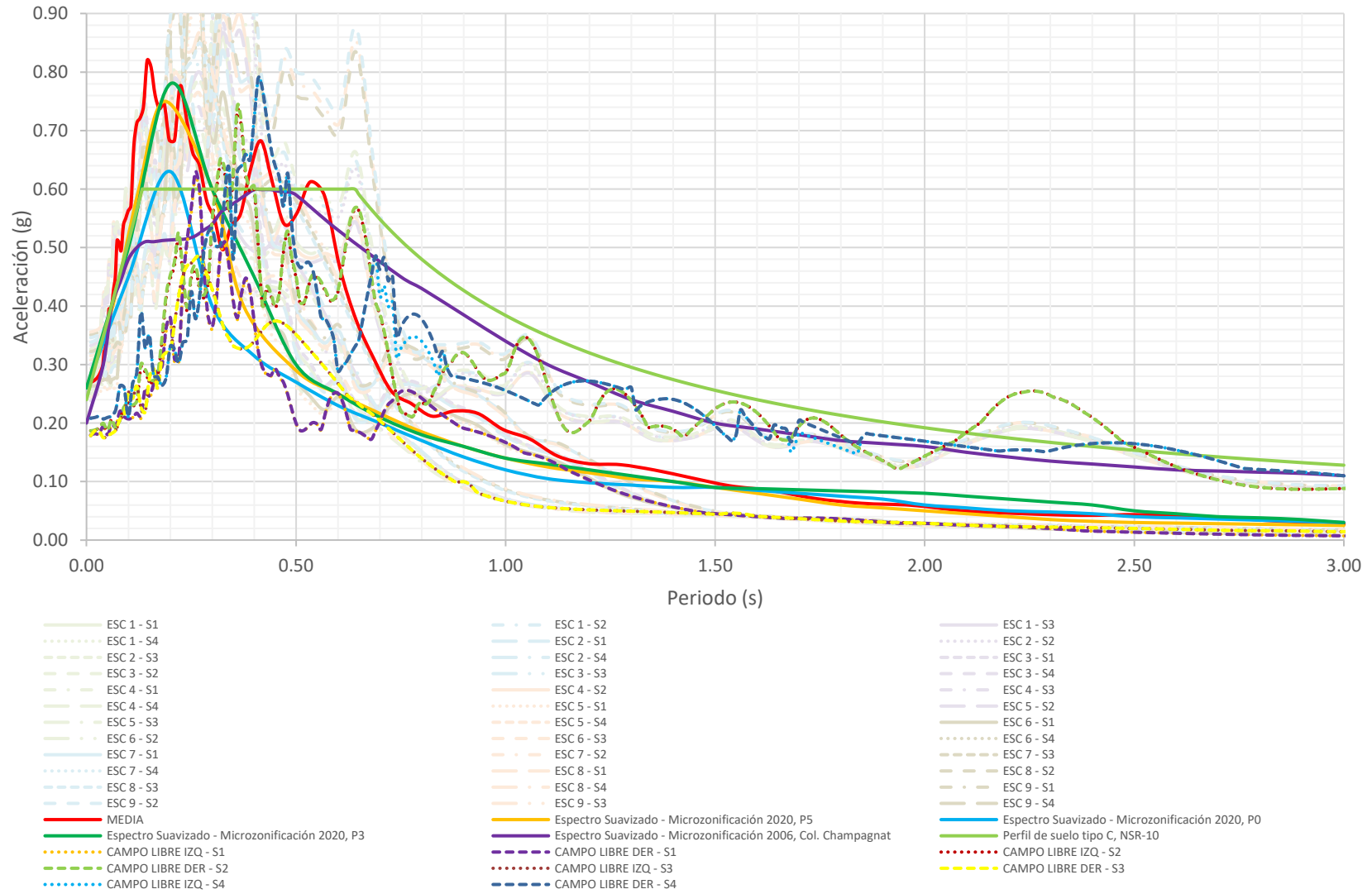


**Tabla 52.***Aceleraciones espectrales en periodos 0s de distintos espectros de respuesta – sitio de análisis 2*

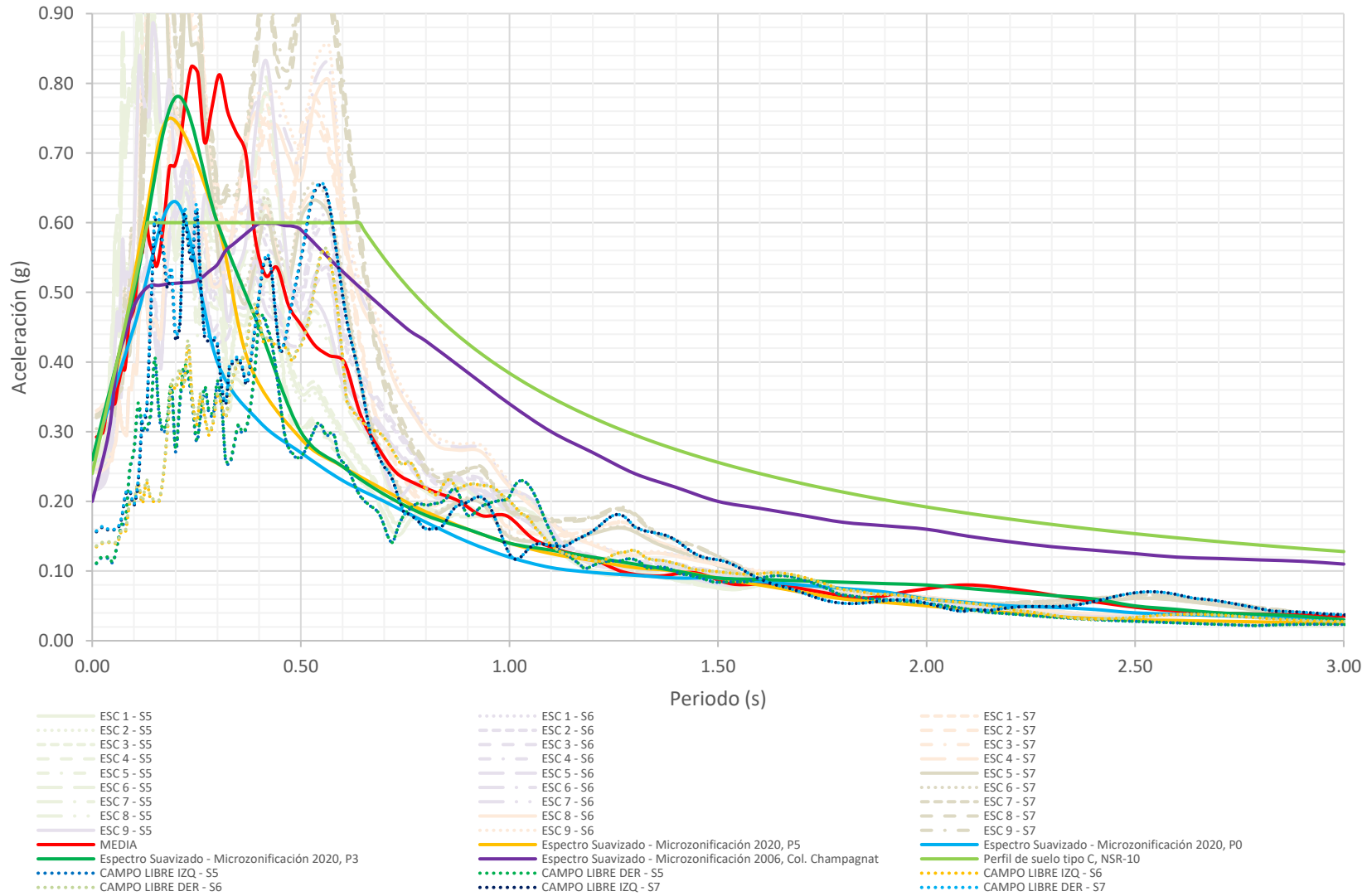
ESPECTRO	Sa (g)	
	CORTICAL	INTRAPLACA
Tipo de Suelo C, NSR-10	0.24	
Espectro suavizado – microzonificación 2006, Col. Champagnat	0.20	
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P5	0.26	
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P0	0.26	
Espectro suavizado – microzonificación 2020, P3	0.26	
Campo libre analisis unidimensional	0.27	0.29
Campo libre analisis bidimensional	0.17 – 0.24	0.16 – 0.19

Fuente. Propia

En el análisis bidimensional del sitio de análisis 2 mostrado en la figura 132, muestra que entre los periodos de 0.1s a 0.2s y de 0,5s a 0,7s, se presentan aceleraciones espectrales de hasta 0.58g. Sin embargo, la máxima aceleración espectral se presenta entre los periodos de 0.2s y 0.5s alcanzando un valor de hasta 0.8g. Lo anterior, hace que se encuentre por encima del espectro de diseño de la NSR-10 para un perfil de suelo tipo C y de la media de las aceleraciones espectrales obtenidas en la modelación unidimensional.

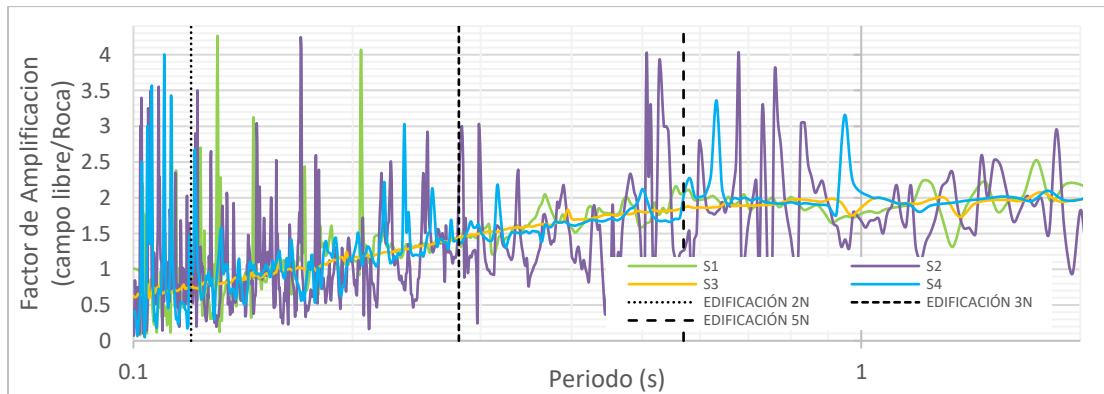


**Figura 132.** Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P0, P3 y P5), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos corticales – Sitio de análisis 2  
**Fuente.** Propia

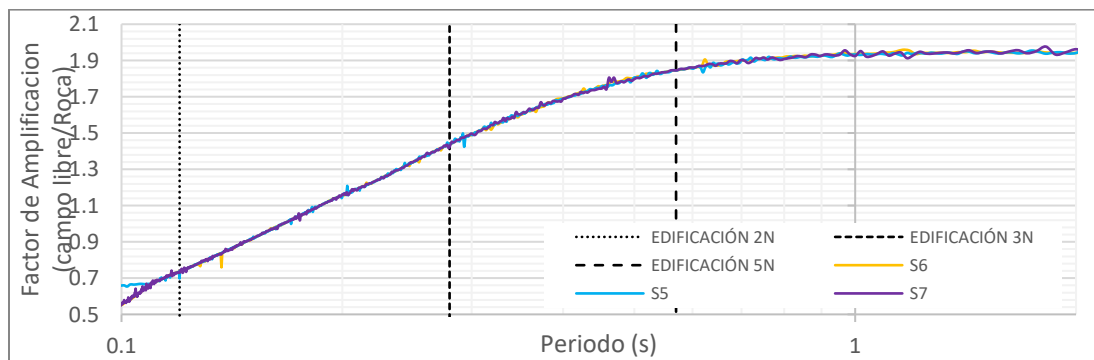


**Figura 133.** Comparación espectros de respuesta del suelo tipo C (NSR-10), Microzonificación sísmica 2006, Microzonificación sísmica 2020 (P0, P3 y P5), Análisis unidimensional y bidimensional para eventos sísmicos intraplaca – Sitio de análisis 2  
**Fuente.** Propia

Los resultados observados en las curvas de transferencia de fuentes sísmicas corticales para el sitio de análisis 2, inciso (a) de la Figura 134; muestran que para periodos de vibración entre 0.1s a 0.2s y de 0.5s a 0.8s las máximas amplificaciones alcanzan valores desde 3.5 a 4.6. Además, entre los periodos 0.2s a 0.35 y de 0.8s a 1.5s, se evidencian amplificaciones de hasta 3. Ahora bien, para las fuentes sísmicas intraplaca, inciso (b), se presentan amplificaciones sísmicas de hasta 2 con crecimiento progresivo a medida que aumenta el periodo de vibración desde 0.11s, arrojando amplificaciones de 2.4 en periodos mayores a 1s.



(a)



(b)

**Figura 134.** Curvas de transferencia (Factores de amplificación) (a) Fuentes sísmicas corticales (b) Fuentes sísmicas intraplaca – Sitio de análisis 2

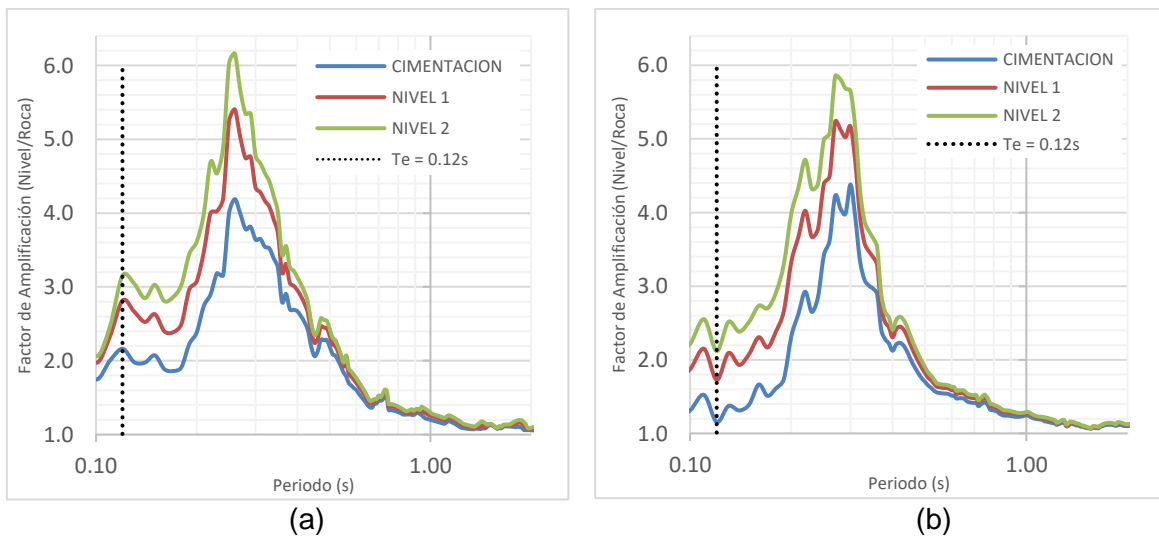
**Fuente.** Propia, apoyándose de los resultados arrojados por el software Plaxis 2D

### 9.3. Sitio de análisis No. 1 – Modelo suelo, sismo y estructura (Edificaciones de 2N y 3N)

Luego de realizar la comparación de las respuestas sísmicas en campo libre para las fuentes corticales e intraplaca, obtenidas por medio de las modelaciones bidimensionales y unidimensionales. Se obtuvieron, los espectros normalizados con

relación a las aceleraciones en roca, en cada uno de los niveles de las edificaciones de 2 y 3 niveles, sobre el sitio de análisis 1.

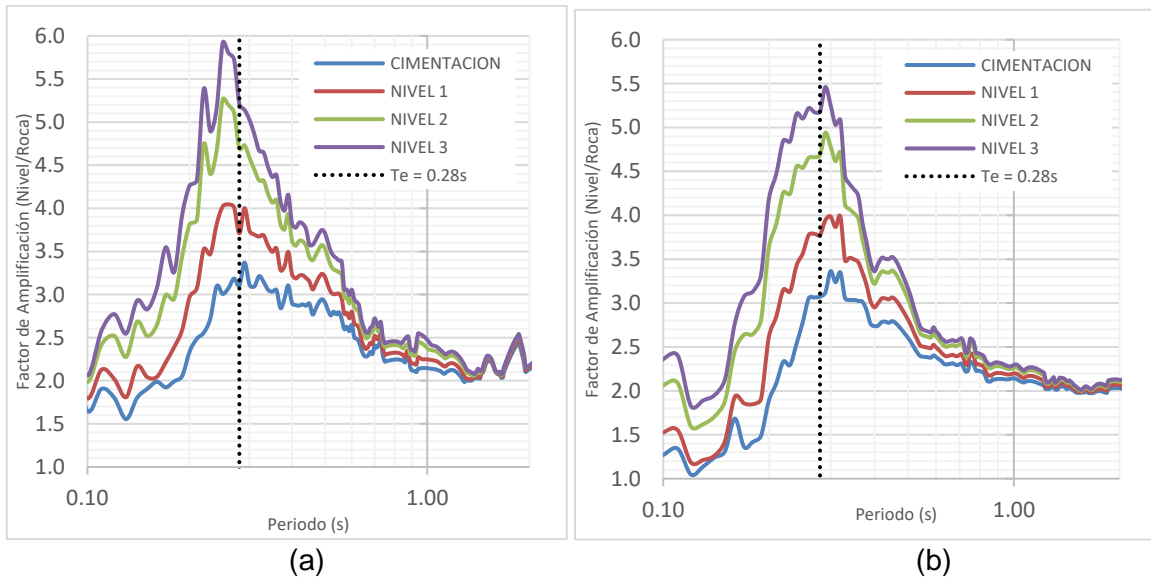
Observando la Figura 135, se logró identificar los factores de amplificación en cada uno de los niveles de la edificación de 2 niveles. En respuesta a la amenaza cortical, inciso (a), se alcanzan factores de amplificación de hasta 6.16 en el nivel 2, amplificaciones de 5.40 en el nivel 1 y a nivel de cimentación se amplifica 4.19 veces la señal en roca. Aunque, para periodos de vibración cercanos al periodo fundamental de la estructura, se producen amplificaciones de hasta 3.2, los máximos factores de amplificación se producen en periodos de 0.27s. Ahora bien, los máximos factores de amplificación de respuesta sísmica a la amenaza intraplaca, inciso (b), alcanzan valores de hasta 5.58, creciendo rápidamente a partir de los 0.18s hasta 0.28s.



**Figura 135.** Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1 y nivel 2 de la estructura de 2N (a) Amenaza sísmica cortical (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 1

**Fuente.** Propia

Para la edificación de 3 niveles las máximas amplificaciones en respuesta a la amenaza cortical se presentan en periodos de 0.26s a 0.29s, alcanzando valores de hasta 5.92 en el nivel 3. Por otra parte, la respuesta a la amenaza sísmica intraplaca, arroja amplificaciones de hasta 5.46 en periodo de 0.29s. En ambos casos, el periodo de vibración en el cual se produce la máxima amplificación se asemeja con el periodo fundamental de vibración de la edificación, el cual es 0.28s. Lo anterior, se evidencia en la Figura 136, inciso (a) amenaza cortical e inciso (b) amenaza intraplaca.



**Figura 136.** Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1, nivel 2 y nivel 3 de la estructura de 3N (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 1  
**Fuente.** Propia

Con base en lo descrito anteriormente, la Tabla 53 muestra los valores de periodos de vibración y aceleración espectral en el instante en que se presentan las máximas de amplificaciones contemplando la edificación de 2 y 3 niveles, tanto para la amenaza cortical como para la intraplaca. Además, la Tabla 54, muestra los valores de desplazamientos horizontales en respuesta a cada una de las fuentes sísmicas inmediatamente debajo de las edificaciones, los cuales van desde valores de los 0.05cm hasta los 16.4cm en la base en cercanía a la edificación.

**Tabla 53.**

*Aceleraciones espectrales y factores de amplificación por niveles de las edificaciones de 2 y 3 niveles– sitio de análisis 1*

EDIFICACION		RESPUESTA		
2 NIVELES		AMENAZA CORTICAL		
NIVEL	AMPLIFICACIÓN	ACELERACIÓN (g)	PERIODO (s)	
Cimentación	4.2	1.6	0.3	
1	5.4	2.0	0.3	
2	6.2	2.2	0.3	
2 NIVELES		AMENAZA INTRAPLACA		
NIVEL	AMPLIFICACIÓN	ACELERACIÓN (g)	PERIODO (s)	
Cimentación	4.4	1.4	0.3	
1	5.2	1.8	0.3	
2	5.9	2.04	0.3	

**Fuente.** Propia

**Tabla 53. Continuación**

*Aceleraciones espectrales y factores de amplificación por niveles de las edificaciones de 2 y 3 niveles– sitio de análisis 1*

EDIFICACION	RESPUESTA			
	AMENAZA CORTICAL			
3 NIVELES	NIVEL	AMPLIFICACIÓN	ACELERACIÓN (g)	PERIODO (s)
	<b>Cimentación</b>	3.4	1.6	0.3
	<b>1</b>	4.04	1.8	0.2
	<b>2</b>	5.3	2.3	0.2
	<b>3</b>	5.9	2.0	0.2
	AMENAZA INTRAPLACA			
	NIVEL	AMPLIFICACIÓN	ACELERACIÓN (g)	PERIODO (s)
	<b>Cimentación</b>	3.36	1.2	0.3
	<b>1</b>	3.99	1.6	0.3
	<b>2</b>	4.94	2.04	0.3
	<b>3</b>	5.46	2.3	0.3

Fuente. Propia

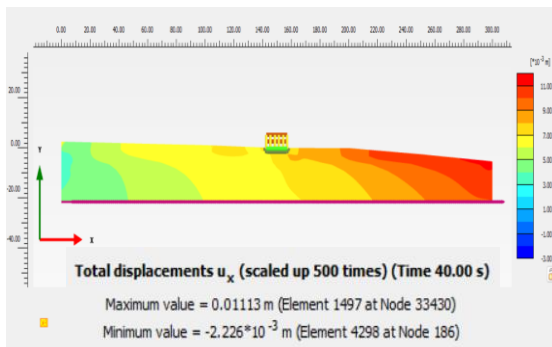
**Tabla 54.**

*Desplazamientos horizontales del suelo, en el sitio de análisis 1.*

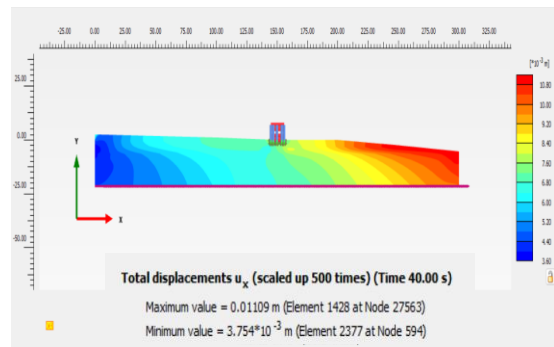
AMENAZA	FUENTE SISMICA	MODELO SUELO + EDIFICACIÓN DE 2N	MODELO SUELO + EDIFICACIÓN DE 3N
		Ux (cm)	
<b>Cortical</b>	S1	0.8	0.6
	S2	7.7	5.7
	S3	3.2	3.3
	S4	16.0	16.4
<b>Intraplaca</b>	S5	0.04	0.04
	S6	0.5	0.4
	S7	6.4	6.4

Fuente. Propia

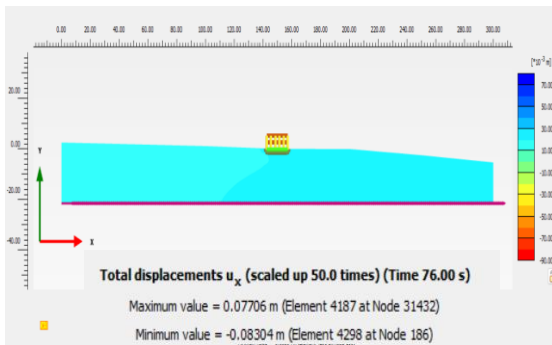
Las figuras 137 y 138 muestran el comportamiento de los desplazamientos horizontales a través de la masa de suelo en respuesta a la amenaza sísmica en campo libre del sitio de análisis 1. Los desplazamientos horizontales a través de todo el perfil del suelo van desde los 1.1cm hasta los 58.6cm en campo libre, mientras que para la amenaza intraplaca, se observan desplazamientos horizontales desde los 0.3cm a 8.6m.



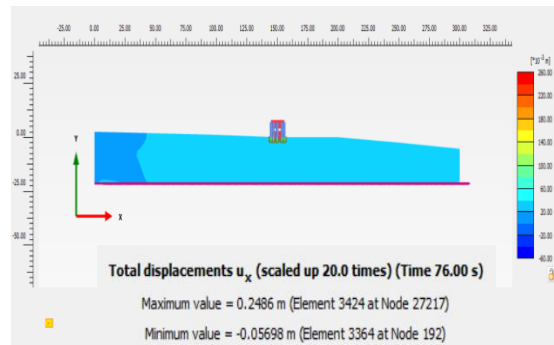
(a)



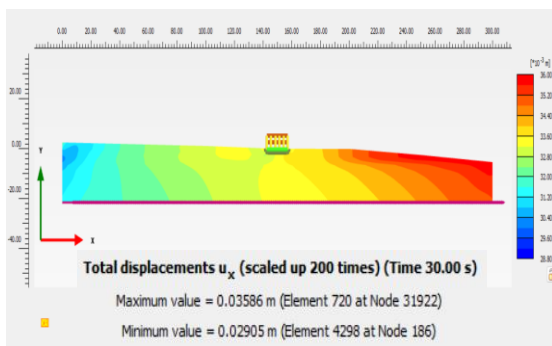
(e)



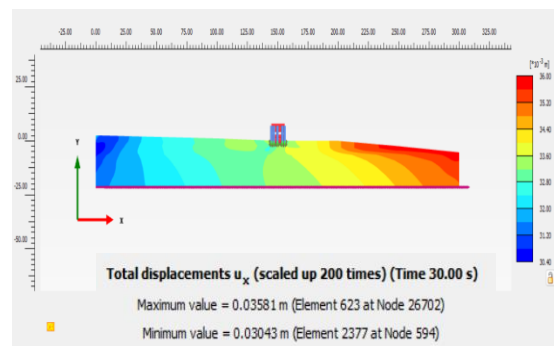
(b)



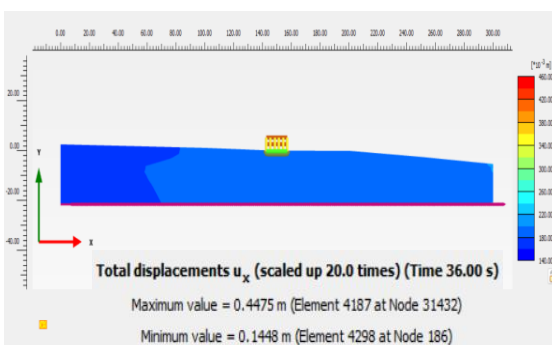
(f)



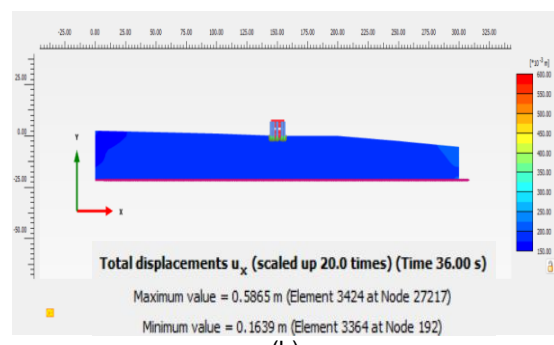
(c)



(g)



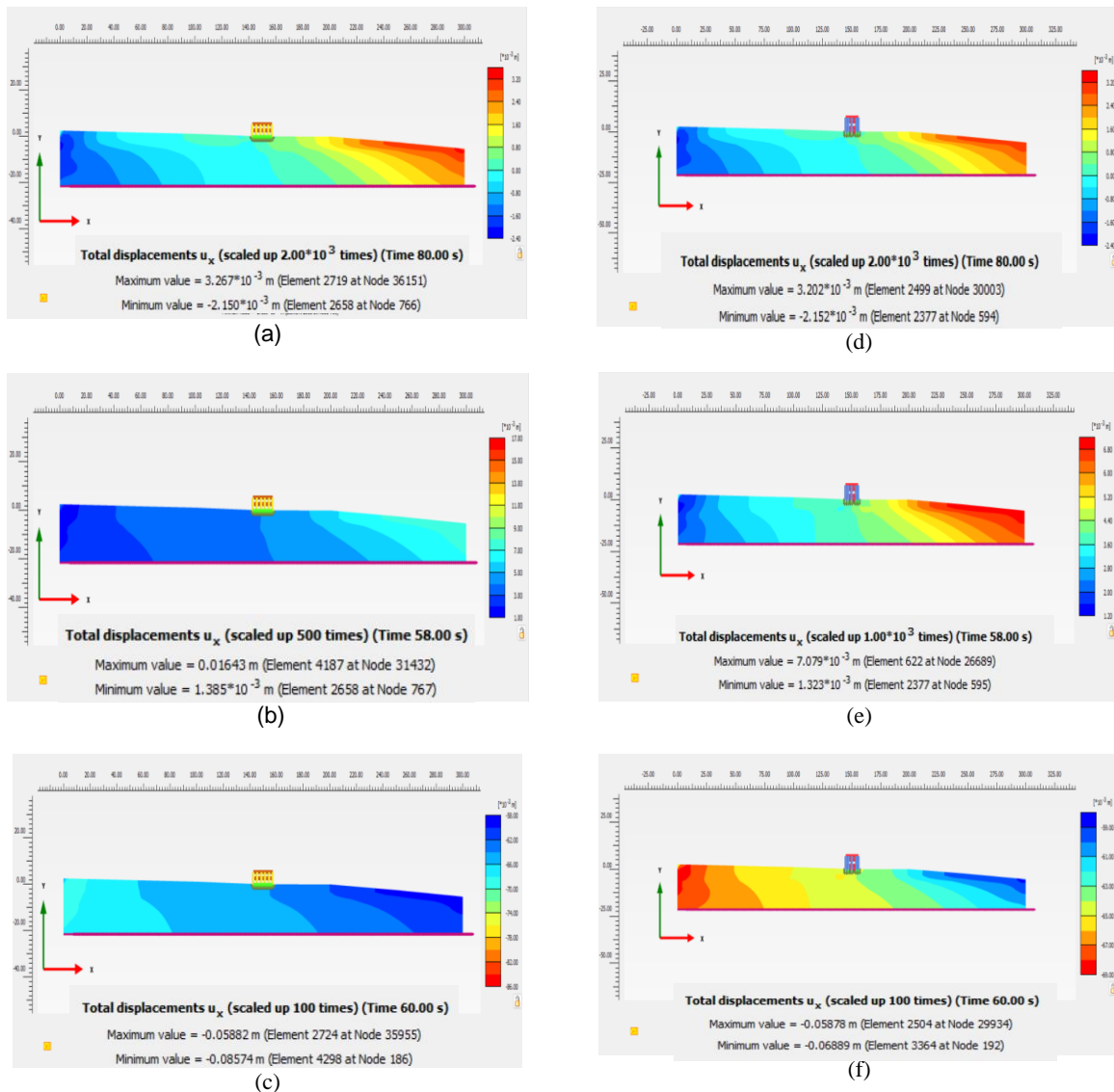
(d)



(h)

**Figura 137.** Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sísmos corticales y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S1-2N, (b) S2-2N, (c) S3-2N, (d) S4-2N, (e) S1-3N, (f) S2-3N, (g) S3-3N, (h) S4-3N.  
**Fuente.** Plaxis 2D Output, V20



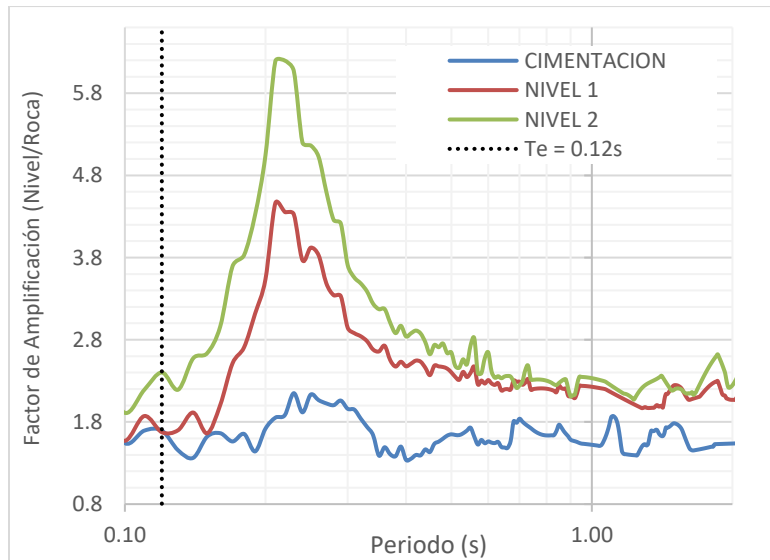


**Figura 138.** Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos intraplaca y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S5-2N, (b) S6-2N, (c) S7-2N, (d) S5-3N, (e) S6-3N, (f) S7-3N.  
**Fuente.** Plaxis 2D Output, V20

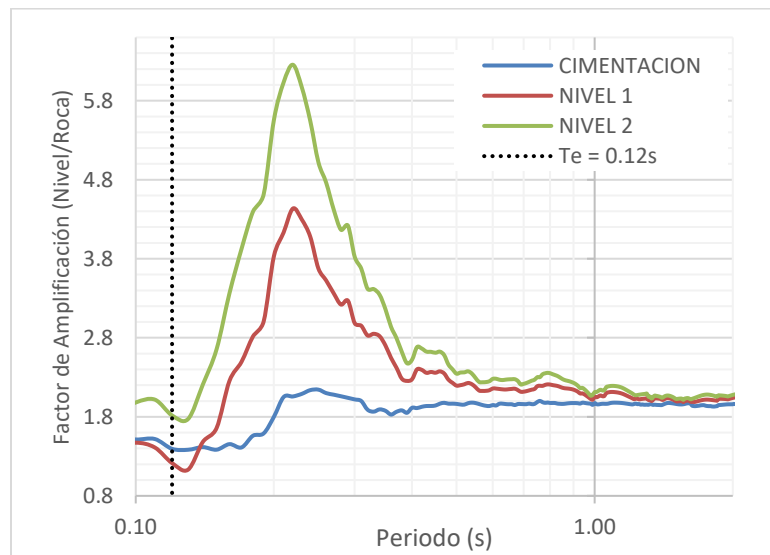
## 9.4. Sitio de análisis No. 2 – Modelo suelo, sismo y estructura (Edificaciones de 2N y 5N)

Una vez determinadas las respuestas sísmicas de los modelos bidimensionales contemplando edificaciones de 2 y 5 niveles para el sitio de análisis 2, se obtuvo lo siguiente: En la edificación de 2 niveles se muestran factores de amplificación con respecto a la amenaza cortical de hasta 6.2 en el nivel 2, alcanzando aceleraciones de hasta 2.2g

en periodos de vibración de 0.21s a 0.23s. Además, la respuesta frente a la amenaza intraplaca, mostró amplificaciones de hasta 2.7 en periodos de vibración de 0.22s. En la Figura 139 se observa lo descrito anteriormente, tanto para la amenaza cortical como intraplaca en los incisos (a) y (b), respectivamente.



(a)

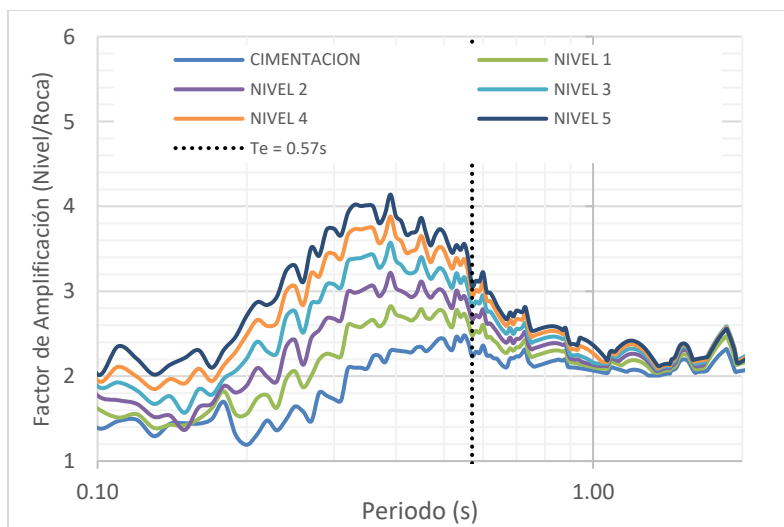


(b)

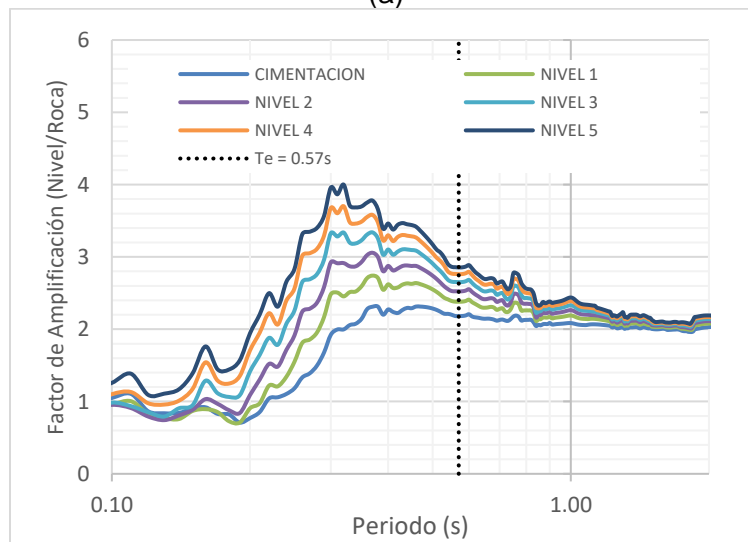
**Figura 139.** Factores de amplificación en la cimentación, nivel 1 y nivel 2 de la estructura de 2N (a) Amenaza sísmica corticales (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 2

**Fuente.** Propia

La Figura 140, refleja los resultados de la respuesta sísmica para la amenaza cortical en el sitio de análisis 2 con una edificación de 5 niveles (inciso (a)); arrojando factores máximos de amplificación de hasta 4.1 y 2.5 para el nivel 5 y el nivel de cimentación, respectivamente. Además, las máximas aceleraciones se dan en un periodo de vibración de 0.4s. Por otro lado, los valores arrojados en la respuesta sísmica frente a la amenaza intraplaca, inciso (b), son de 4.0 para el nivel 5 y 2.3 para el nivel de cimentación. Sin embargo, aunque los factores de amplificación son similares a los arrojados frente a la amenaza sísmica cortical, las máximas aceleraciones espectrales frente a la amenaza sísmica intraplaca, se presentan en un periodo de vibración de 0.3s.



(a)



(b)

**Figura 140.** Factores de amplificación en cada nivel de los cinco niveles de la estructura (a) Amenaza sísmica cortical (b) amenaza sísmica intraplaca – Sitio de análisis 2

Fuente. Propia

Tal y como se realizó para el sitio de análisis 1; en la Tabla 55, se muestran los valores de los periodos de vibración y aceleración espectral en el instante en que se presentan las máximas de amplificaciones en las edificaciones de 2 y 5 niveles, tanto para la amenaza cortical como para la intraplaca.

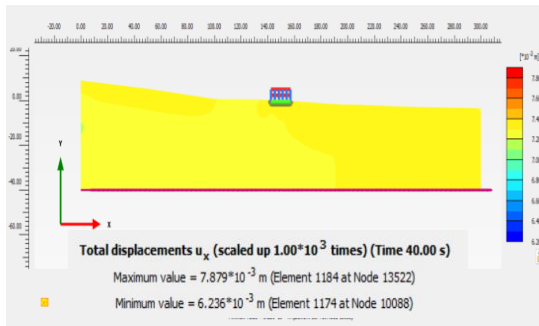
**Tabla 55.**

*Aceleraciones espectrales y factores de amplificación por niveles de las edificaciones de 2 y 5 niveles – sitio de análisis 2*

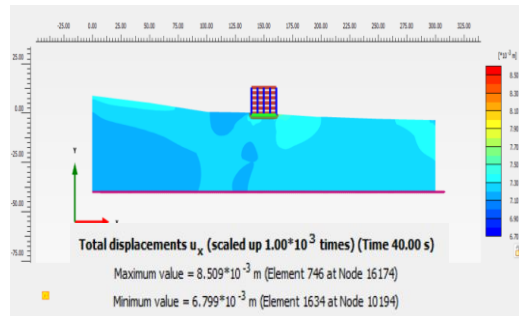
<b>EDIFICIACION</b>	<b>RESPUESTA</b>			
2 NIVELES	<b>AMENAZA CORTICAL</b>			
	<b>NIVEL</b>	<b>AMPLIFICACIÓN</b>	<b>ACELERACIÓN (g)</b>	<b>PERIODO (s)</b>
	<b>Cimentación</b>	2.1	1.0	0.2
	<b>1</b>	4.5	1.7	0.2
	<b>2</b>	6.2	2.2	0.2
	<b>AMENAZA INTRAPLACA</b>			
	<b>NIVEL</b>	<b>AMPLIFICACIÓN</b>	<b>ACELERACIÓN (g)</b>	<b>PERIODO (s)</b>
	<b>Cimentación</b>	2.1	0.7	0.2
	<b>1</b>	4.4	1.9	0.2
	<b>2</b>	6.2	2.7	0.2
5 NIVELES	<b>AMENAZA CORTICAL</b>			
	<b>NIVEL</b>	<b>AMPLIFICACIÓN</b>	<b>ACELERACIÓN (g)</b>	<b>PERIODO (s)</b>
	<b>Cimentación</b>	2.5	1.3	0.6
	<b>1</b>	2.8	1.6	0.4
	<b>2</b>	3.2	1.7	0.4
	<b>3</b>	3.6	1.9	0.4
	<b>4</b>	3.9	2.0	0.4
	<b>5</b>	4.1	2.1	0.4
	<b>AMENAZA INTRAPLACA</b>			
	<b>NIVEL</b>	<b>AMPLIFICACIÓN</b>	<b>ACELERACIÓN (g)</b>	<b>PERIODO (s)</b>
<b>Cimentación</b>	2.3	0.6	0.5	
<b>1</b>	2.7	0.7	0.4	
<b>2</b>	3.1	0.8	0.4	
<b>3</b>	3.3	0.8	0.4	
<b>4</b>	3.7	0.9	0.3	
<b>5</b>	4.0	0.9	0.3	

**Fuente.** Propia

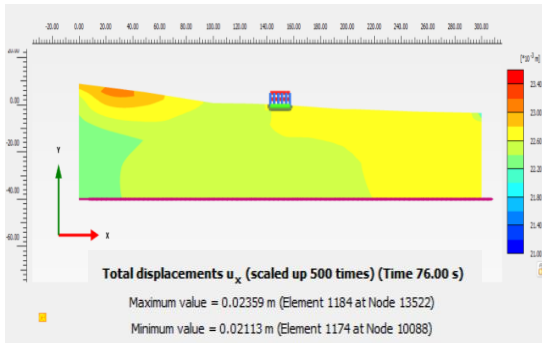
En el sitio de análisis 2, se presentan desplazamientos horizontales que van desde los 0.6cm hasta los 18.9cm en respuesta a las fuentes sísmicas corticales y para la amenaza intraplaca de hasta 19.7cm, lo anterior, se logró verificar gráficamente en las figuras 141 y 142. Por otra parte, en la Tabla 56 se reflejan los valores de desplazamientos horizontales máximos inmediatamente debajo de cada de las edificaciones de 2 y 5 niveles que van desde 0.7cm hasta 18.9cm.



(a)



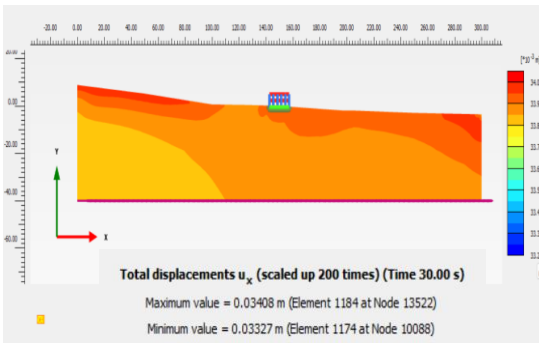
(e)



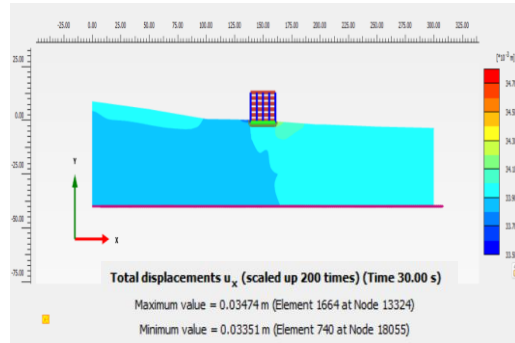
(b)



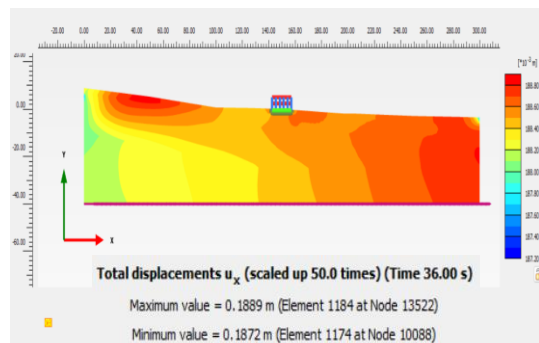
(f)



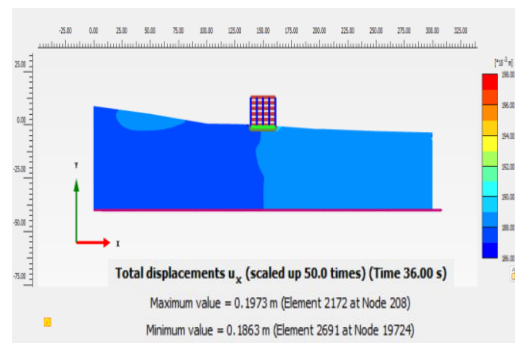
(c)



(g)

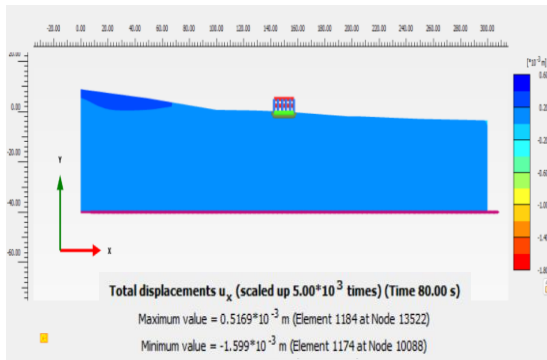


(d)

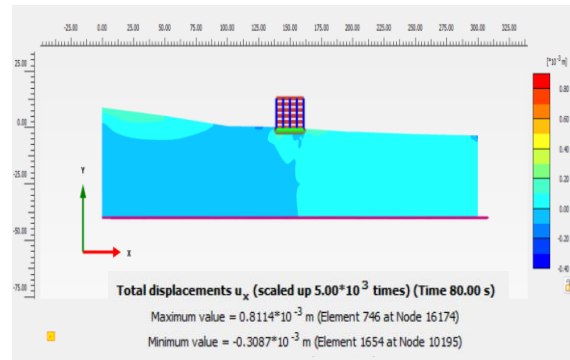


(h)

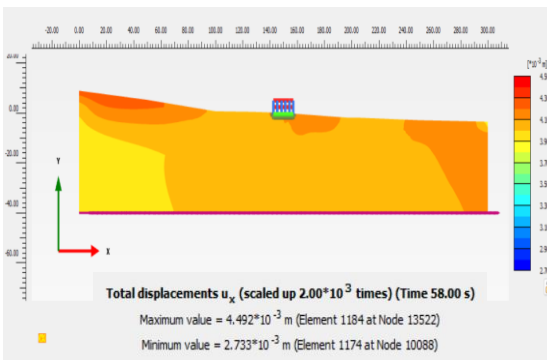
**Figura 141.** Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos corticales y estructuras de 2 y 5 niveles del sitio de análisis 2, (a) S1-2N, (b) S2-2N, (c) S3-2N, (d) S4-2N, (e) S1-5N, (f) S2-5N, (g) S3-5N, (h) S4-5N.  
**Fuente.** Plaxis 2D Output, V20



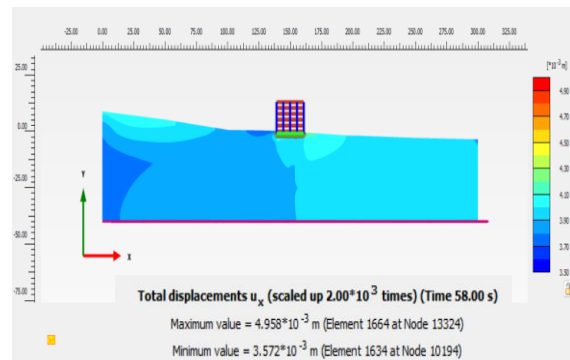
(a)



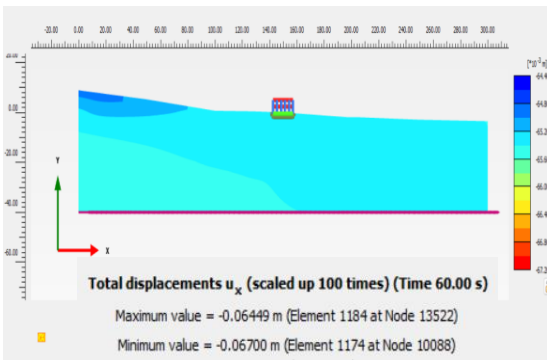
(d)



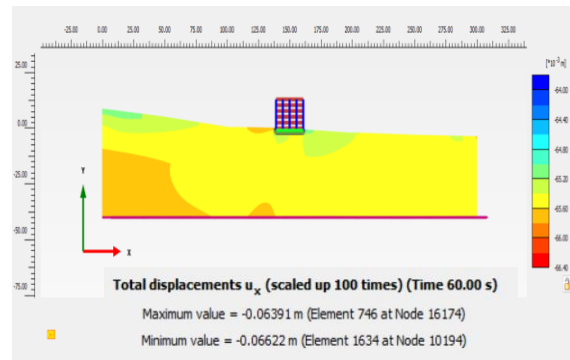
(b)



(e)



(c)



(f)

**Figura 142.** Desplazamientos Horizontales en modelos suelo, sismos intraplaca y estructuras de 2 y 3 niveles del sitio de análisis 1, (a) S5-2N, (b) S6-2N, (c) S7-2N, (d) S5-5N, (e) S6-5N, (f) S7-5N.

**Fuente.** Plaxis 2D Output, V20

**Tabla 56.***Desplazamientos horizontales del suelo, en el sitio de análisis 2.*

AMENAZA	FUENTE SISMICA	MODELO SUELO + EDIFICACIÓN DE 2N	MODELO SUELO + EDIFICACIÓN DE 5N
		Ux (cm)	
		Max	Max
<b>Cortical</b>	S1	0.7	0.7
	S2	2.3	2.2
	S3	3.4	3.4
	S4	18.9	18.8
<b>Intraplaca</b>	S5	0.02	0.01
	S6	0.4	0.4
	S7	6.5	6.5

**Fuente.** Propia

## 9.5. Desplazamientos en elementos estructurales

Teniendo en cuenta las respuestas sísmicas arrojadas en las modelaciones bidimensionales, se determinaron los desplazamientos horizontales desde la base hasta el nivel superior de cada una de las estructuras; con la finalidad de evidenciar la afectación directa sobre los elementos estructurales en relación con las derivas permisibles dadas por la NSR-10 y con base en el tipo de sistema estructural de resistencia sísmica (mampostería confinada o pórticos en concreto resistentes a momentos).

En el sitio de análisis 1, los desplazamientos horizontales de los elementos estructurales de las edificaciones de 2 y 3 niveles son relativamente similares; arrojando valores de desplazamientos diferenciales desde la base hasta la parte más alta de las edificaciones de 4cm en respuesta a las fuentes sísmicas corticales y de 2cm para fuentes sísmicas de intraplaca. Por otro lado, las edificaciones analizadas sobre el sitio de análisis 2, mostraron desplazamientos horizontales de 7.9cm en la base y de 11.9cm en la cubierta de la edificación de 2 niveles y hasta 12.80cm en la terraza de la edificación de 5 niveles.

En la Tabla 57, se observan los máximos desplazamientos horizontales en cada uno de los niveles de las edificaciones con respecto a la fuente sísmica. Así mismo, muestra los diferenciales de desplazamientos en comparación con la deriva permisible dadas por la NSR-10. En la Tabla mencionada, H corresponde al nivel en altura del entrepiso en unidades de metros (m), Ux y  $\Delta u_x$  son los desplazamientos horizontales y el diferencial de desplazamiento desde la base hasta el nivel máximo de cada edificación, respectivamente.

**Tabla 57.**

Desplazamientos horizontales ( $U_x$ ) en elementos estructurales con respecto a las derivas dadas por la NSR-10

SITIO DE ANALISIS	UBICACIÓN	H (m)	Deriva Max NSR-10 (cm)	CORTICAL		INTRAPLACA	
				$U_x$ (cm)	$\Delta u_x$ (cm)	$U_x$ (cm)	$\Delta u_x$ (cm)
<b>1</b> <b>Edif 2N</b>	Cimentación	-0.258	0.00	7.8		3.8	
	Nivel 1	2.63	0.5% x H	1.3	10.2	3.9	4.9
	Nivel 2	5.26		2.6	11.7		5.7
<b>1</b> <b>Edif 3N</b>	Cimentación	-1.00	0.0	7.8		3.8	
	Nivel 1	2.00	1% x H	2.0	10.2	4.0	4.9
	Nivel 2	5.00		5.0	11.1		5.4
	Nivel 3	7.00		7.0	11.8		5.8
<b>2</b> <b>Edif 2N</b>	Cimentación	-0.258	0.0	7.9		3.7	
	Nivel 1	2.63	0.5% x H	1.3	10.3	4.0	4.9
	Nivel 2	5.26		2.6	11.9		5.8
<b>2</b> <b>Edif 5N</b>	Cimentación	-2.00	0.0	7.9		3.8	
	Nivel 1	2.60		2.6	9.5		4.6
	Nivel 2	5.20	1% x H	5.2	10.3	4.9	5.0
	Nivel 3	7.80		7.8	11.1		5.4
	Nivel 4	10.4		10.4	12.0		5.8
	Nivel 5	13.0		13.0	12.8		6.2

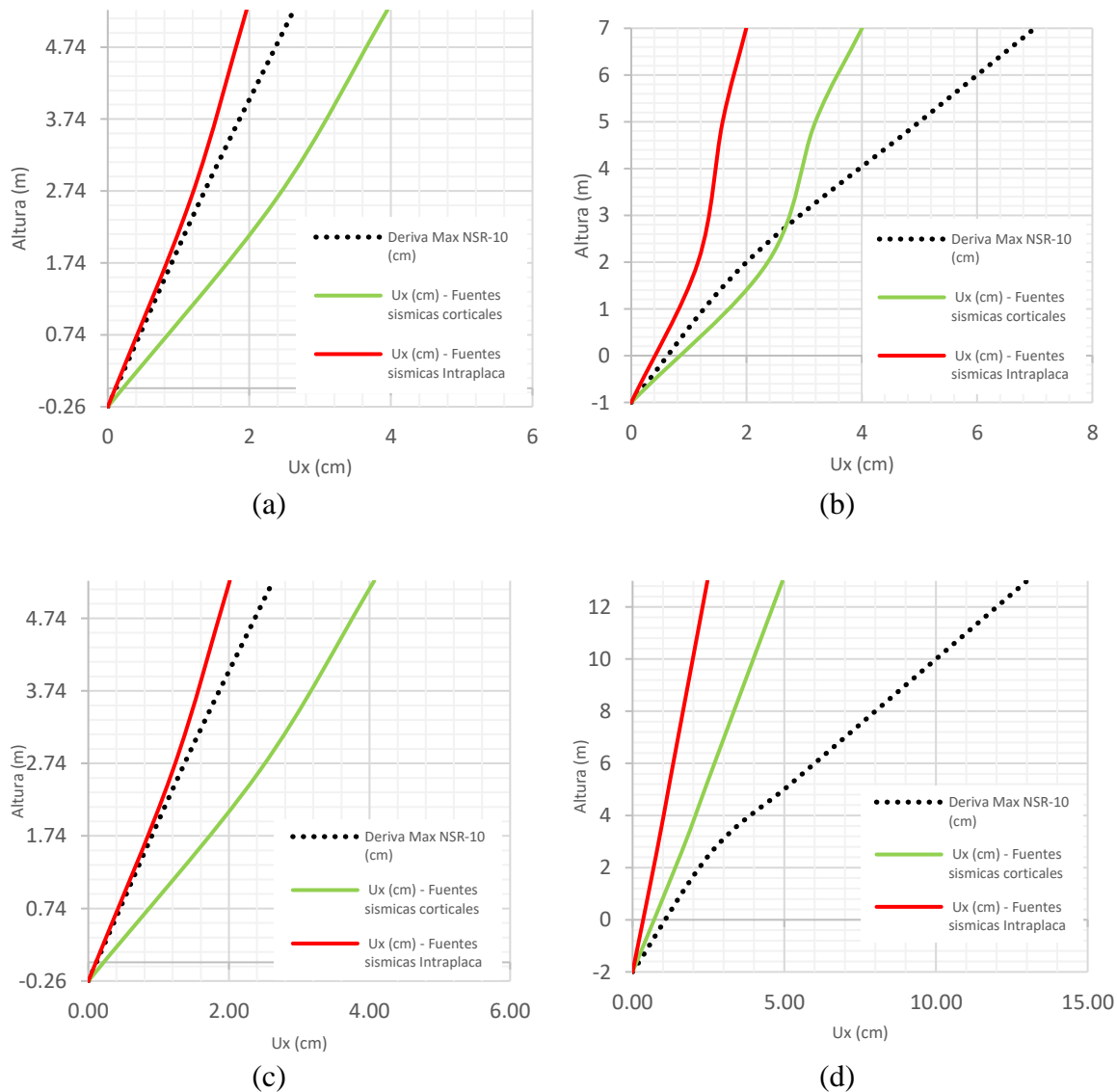
Fuente. Propia

De acuerdo con la altura de la edificación de 2 niveles la deriva permitida es el 0.5% la altura del nivel; es decir, que en el nivel 2 la máxima deriva es de 2.63cm. Sin embargo, el diferencial de desplazamiento horizontal en la misma resultó de 3.9cm en el sitio de análisis 1 y de 4.0cm en el sitio de análisis 2. En relación con lo anterior, las edificaciones de 2 niveles, las cuales predominan sobre el área de estudio frente a la amenaza sísmica cortical van a presentar desplazamientos horizontales mayores a las derivas permitidas por la NSR-10. Ahora bien, frente a la amenaza intraplaca, sus desplazamientos no superarán la deriva permisible.

Además de lo anterior, las edificaciones de 3 y 5 niveles cuyos sistemas de resistencia sísmica correspondiente a pórticos en concreto resistentes a momentos tienen como deriva permisible el valor del 1% su altura; es decir, derivas máximas permitidas de 7cm y 13cm en el nivel más alto, respectivamente. Es por esto, que al determinar los desplazamientos horizontales en el nivel superior de las edificaciones, se evidenció, que frente a la amenaza cortical se alcanzaran desplazamientos de 4cm en la estructura de 3



niveles y 4.9cm en la edificación de 5 niveles. Ahora bien, en respuesta a la amenaza intraplaca se obtienen desplazamientos horizontales de 2cm en la edificación de 3 niveles y de 2.5cm en la edificación de 5 niveles (Ver Figura 143).



**Figura 143.** Diagramas de derivas según la NSR-10 por nivel, desplazamientos horizontales en respuesta a la amenaza sísmica cortical e intraplaca. (a) S1 – 2N, (b) S1 – 3N, (c) S2 – 2N, (d) S2 – 5N.

**Fuente.** Propia con información arrojada por las modelaciones bidimensionales en Plaxis 2D V20.

## 9.6. Zonificación por interacción sísmica suelo estructura






Haciendo uso de la información obtenida y analizada en las modelaciones bidimensionales, se establecieron mapas de zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura (ISSE), contemplando tres variables. La primera, corresponde al Índice de Resonancia Sísmica (IRS), obtenida por medio de la relación entre el periodo fundamental de vibración de las edificaciones ( $T_e$ ) con respecto al periodo de predominante vibración en superficie del suelo bajo las estructuras ( $T_s$ ); de acuerdo con el criterio del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal de México, 2004; en el cual, se estableció que las máximas aceleraciones espectrales se dan entre las relaciones  $T_e/T_s$  de 0.7 a 1.2, siguiendo lo indicado en la ecuación 28.

$$0.7 \leq \frac{T_e}{T_s} \leq 1.2 \quad \rightarrow \quad 0.7 \leq IRS \leq 1.2 \quad (28)$$

Con el fin de discretizar el índice de resonancia sísmica se tomó la categorización de la Tabla 58.

**Tabla 58.**

*Categorización del Índice de Resonancia Sísmica (IRS)*

	<b>CATEGORIA</b>	<b>FACTOR</b>	<b>VALOR</b>
	Muy Baja	0.5	$0.2 \geq IRS \geq 1.7$
	Baja	1.0	$0.2 < IRS \leq 0.5$ y $1.7 > IRS \geq 1.5$
	Media	1.5	$0.5 < IRS \leq 0.7$ y $1.5 > IRS \geq 1.2$
	Alta	2.0	$0.7 < IRS \leq 0.8$ y $1.2 > IRS \geq 1.1$
	Muy Alta	2.5	$0.8 < IRS < 1.1$






**Fuente.** Propia

Como segunda variable, se tomó el Índice de Deriva Máxima (IDM), que relaciona los máximos desplazamientos de las edificaciones arrojadas por las modelaciones bidimensionales con respecto a la deriva máxima permitida en la Tabla A.6.4-1 del Título A de la NSR-10, el cual indica lo siguiente:

- Estructura de concreto reforzado, metálicas, madera y de mampostería estructural que cumplan con los requerimientos del numeral A.6.4.2.2; su desplazamiento máximo permitido es del 1% la altura del entrepiso.
- Estructuras en mampostería que cumplan los requisitos de numeral A.6.4.2.3, la deriva máxima permisible es del 0.5% la altura del entrepiso.

De la misma forma, teniendo en cuenta el IDM, se estableció el esquema para su categorización, tal y como se muestra en la Tabla 59.

**Tabla 59.***Categorización del índice de Deriva Máxima (IDM)*




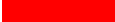
	<b>CATEGORIA</b>	<b>FACTOR</b>	<b>VALOR</b>
	Muy Baja	0.3	$IDM < 0.7$
	Baja	0.6	$0.7 \leq IDM < 0.8$
	Media	0.9	$0.8 \leq IDM < 0.9$
	Alta	1.2	$0.9 \leq IDM < 1.0$
	Muy Alta	1.5	$IDM \geq 1.0$

**Fuente.** Propia

Teniendo en cuenta que las modelaciones bidimensionales se establecieron para edificaciones de 2, 3 y 5 niveles, las derivas para las edificaciones de distinto número de niveles se proyectaron de acuerdo con los resultados obteniendo en las edificaciones analizadas. Lo anterior, con el fin de abarcar la totalidad de edificaciones presentes en el sitio de análisis.

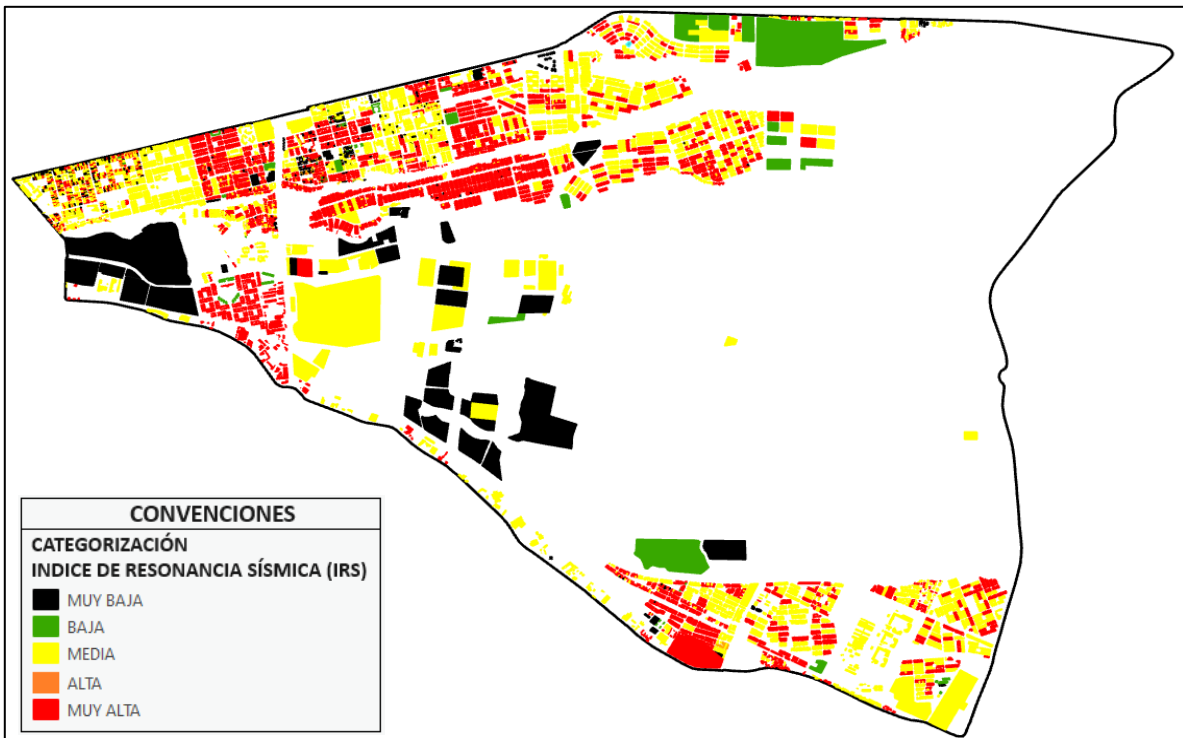
La tercera variable que se contempló para la zonificación por ISSE es la edad de la edificación (Antigüedad), con el fin de tener en cuenta los requerimientos técnicos de las edificaciones, de acuerdo con la normativa vigente en el año de su construcción. Para lo anterior, se consideró la siguiente categorización.

**Tabla 60.***Categorización del riesgo por la edad de la edificación (Antigüedad)*

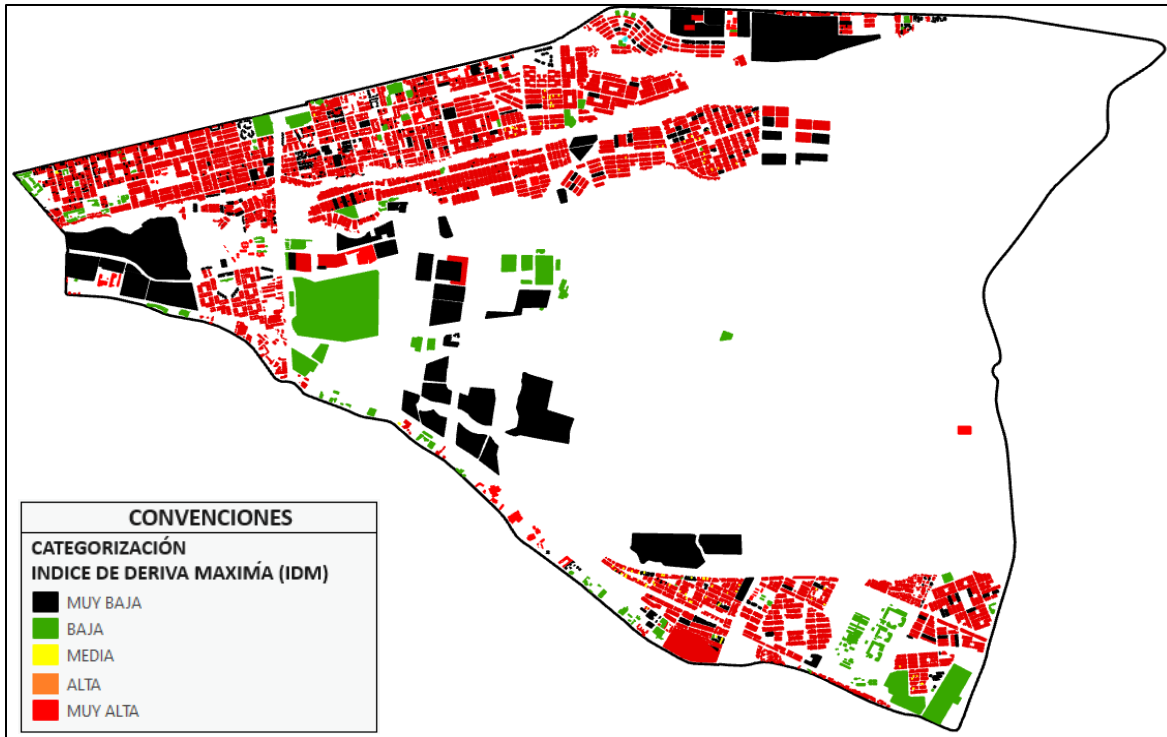
	<b>CATEGORIA</b>	<b>FACTOR</b>	<b>AÑO DE CONSTRUCCION</b>
	Baja	0.4	Después del año 2010
	Media	0.6	Entre los años 1998 y 2010
	Alta	0.8	Entre los años 1984 y 1998
	Muy Alta	1.0	Antes del año 1984

**Fuente.** Propia

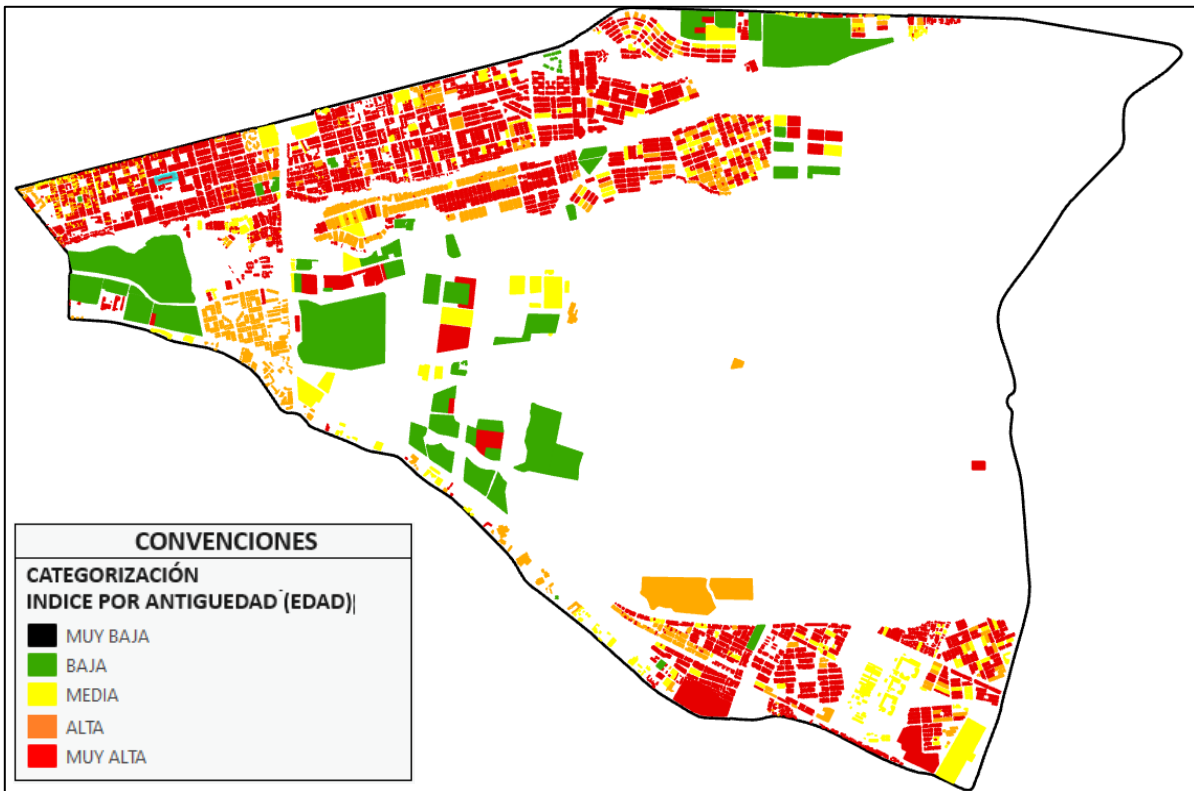
Las figuras 144, 145 y 146, muestran los mapas de la categorización del índice de resonancia sísmica, índice de deriva máxima e influencia de la edad de la edificación, respectivamente. Lo anterior, se estableció sobre cada uno de los elementos estructurales dentro del área de estudio.



**Figura 144.** Mapa de categorización por Índice de Resonancia Sísmica (ISSE)  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.



**Figura 145.** Mapa de categorización por Índice de Deriva Máxima (IDM)  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.



**Figura 146.** Mapa de categorización por la edad de la edificación (Antigüedad).  
**Fuente.** Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

Considerando las tres variables descritas anteriormente, se estableció la categorización de la zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura de la Zona de Expansión Oriental de la Ciudad De Ibagué de acuerdo con la ecuación 29, y siguiendo la escala de la Tabla 61.

$$R_{ISSE} = IRS + IDM + Antigüedad \quad (29)$$

Donde,

$R_{ISSE}$  = Riesgo por Interacción Sísmica Suelo – Estructura





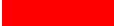
$IRS$  = Índice de resonancia sísmica

$IDM$  = Índice de deriva máxima

$Antigüedad$  = Edad de la edificación

**Tabla 61.**

*Categorización del Riesgo por Interacción Sísmica Suelo- Estructura ( $R_{ISSE}$ )*

	<b>CATEGORIA</b>	<b><math>R_{ISSE}</math></b>
	Muy baja	$R_{ISSE} \leq 1.5$
	Baja	$1.5 < R_{ISSE} \leq 2.5$
	Media	$2.5 < R_{ISSE} \leq 3.5$
	Alta	$3.5 < R_{ISSE} \leq 4.5$
	Muy Alta	$R_{ISSE} > 4.5$

**Fuente.** Propia

La Figura 147, muestra que alrededor del 89.2% de las edificaciones se encuentran en categoría de Riesgo alto y muy Alto por Interacción Sísmica Suelo-Estructura y tan solo un 10.8% se encuentra en la categoría de Riesgo medio, bajo y muy bajo. Tal y como se evidencia en la Tabla 62.

**Tabla 62.**

*Discretización de la categoría del Riesgo por ISSE de acuerdo con el tipo de unidad de construcción*

<b>CATEGORIA</b>	<b>UNIDAD DE CONSTRUCCION</b>						
	<b>1.I</b>	<b>1.II</b>	<b>1.III</b>	<b>1.IV</b>	<b>2.I</b>	<b>2.IV</b>	<b>3.I</b>
Muy baja	0	1	6	0	21	2	213
Baja	1102	4	5	0	730	0	0
Media	1003	191	109	1	143	0	0
Alta	12672	43	67	4	0	0	0
Muy Alta	16328	2	11	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>31105</b>	<b>241</b>	<b>198</b>	<b>5</b>	<b>894</b>	<b>2</b>	<b>213</b>

**Fuente.** Propia

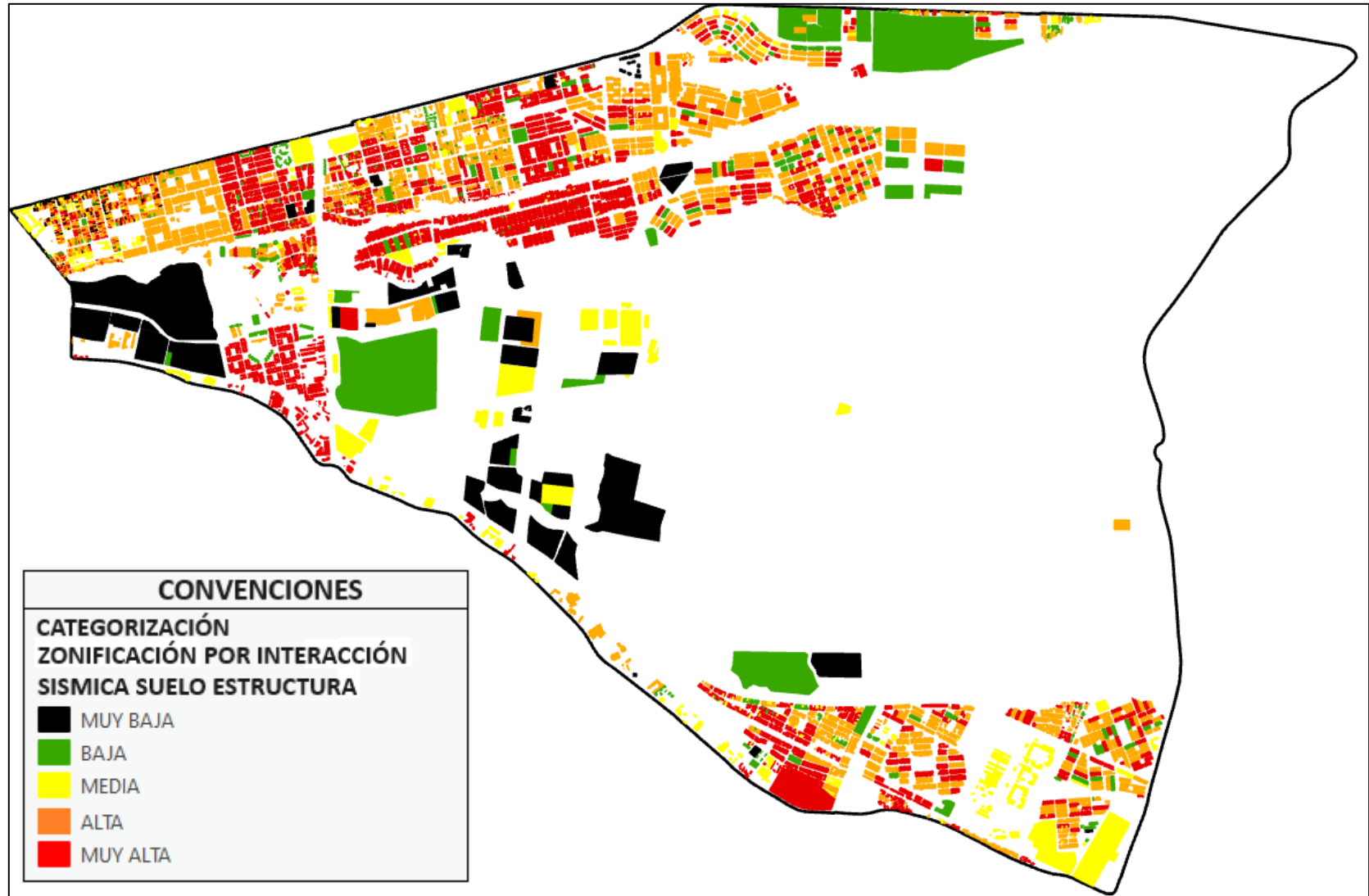


Figura 147. Mapa de zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura ( $R_{ISSE}$ )  
Fuente. Mapa propio obtenido con ayuda del ArcGIS Pro, 2020.

## Capítulo X

### Resumen, limitaciones, conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el desarrollo de los capítulos del proyecto, a continuación, se expone un resumen siguiendo la metodología implementada, las limitaciones presentadas, las conclusiones obtenidas de los resultados y análisis y por último, las recomendaciones para futuros proyectos de investigación:

#### 10.1. Resumen

1. La geología de la zona de expansión oriental de la ciudad de Ibagué, se obtuvo mediante la recopilación documental de los estudios geológicos, hidrológicos, morfológicos y geotécnicos realizados con anterioridad. Además, se hizo uso de fotografías de estratigrafías de estudios anteriores y fotografías propias tomadas sobre el sector del Aeropuerto Perales, Barrio Mandarinos y sobre el sector del Centro de la ciudad a la altura de la carrera 18 sur y carrera 1 sur.
2. Conociendo la tipología de construcciones existentes en el área de estudio, se realizó el inventario de estructuras mediante visitas de campo, uso de fotografías aéreas Street view de Google, Google Earth e información del Geoportal Catastral del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC; adicionalmente, se diferenció cuáles edificaciones se encuentran construidas en su totalidad y/o en construcción. Por otro lado, y teniendo en cuenta que existen 11 planes parciales aprobados, de los cuales 4 no presentan desarrollo urbanístico actual, se optó por realizar la investigación a través de las empresas constructoras y curadurías sobre la tipología de edificaciones proyectadas y que en trámite de licencia de urbanismo y/o construcción.
3. La caracterización estructural estuvo compuesta por la identificación de 32.658 estructuras de las cuales alrededor del 98.6% correspondieron a construcciones de ocupación normal y en una proporción de 1.4% para uso especial. No obstante, con la finalidad de brindar claridad y orden a la información, se hizo uso de la tipología de unidades de construcción y grupo de uso implementados por la NSR-10. Con la anterior, se discretizó alrededor de 213 estructuras de categoría alta, 894 unidades de categoría media, el excedente corresponde a construcciones de categoría baja y no se identificaron edificaciones de categoría especial.
4. Se logró caracterizar estructuralmente  $10 \text{ km}^2$  con relación a los  $21.57 \text{ km}^2$  del área de estudio; además, cerca de  $3 \text{ km}^2$  corresponden a zonas de jardines, parques,



zonas verdes, vías y avenidas. Así mismo, el polígono cuenta con un área de  $8.57 \text{ km}^2$  sin información estructural, en primera medida por no encontrarse aprobada o en proceso de licenciamiento, y segunda instancia, por no contar con información sobre las proyecciones estructurales de futuros proyectos sobre dicha área.

5. Teniendo en cuenta lo indicado en la NSR-10, se realizó la caracterización estructural de cada una de las viviendas ubicadas sobre el polígono de trabajo; con base en esto, se obtuvo propiedades como la categoría de unidad de construcción, grupo de uso, número de niveles, sistema de resistencia sísmica, tipo de cimentación, uso y periodo fundamental de vibración. Este último, determinado según lo indicado en el numeral A.4.2 del título H de la NSR-10.
6. La determinación de las propiedades geomecánicas y dinámicas de los suelos se lograron determinar de manera inicial con el consolidado de la información de alrededor de 114 estudios geotécnicos realizados sobre la ciudad de Ibagué. Sin embargo, una vez revisada y filtrada la información, se excluyeron todos los estudios con sondeos a profundidades menores a 6m y que presentaran incongruencias con relación a los tipos de suelos existentes.

Lo anterior, permitió filtrar y hacer uso de información geotecnia clara y sólida; además, la determinación de propiedades dinámicas estuvo dada por la información geotécnica implementada en la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué del año 2006 e información entregada por la Secretaría de Gestión del Riesgo de la Alcaldía de Ibagué.

7. Las propiedades dinámicas de los suelos se determinaron implementando en primera instancia, las curvas dinámicas establecidas por distintos autores entre ellos Zang (2005), Seed & Idriss (1970), Menq (2003) y Andrus (2003) para limos y arenas y Darendeli (2001) y Zhang (2005) para arcillas; en segunda instancia, la creación de curvas dinámicas por medio de los resultados de ensayos geofísicos. Con base en esto, se compararon con respecto a las curvas dinámicas implementadas en la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Ibagué del año 2020.
8. La desagregación de amenaza sísmica fue establecida mediante la comparación del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia del año 2009, el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia desarrollado en el año 2020 y la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ibagué del año 2006. Ahora bien, una vez seleccionados los eventos sísmicos que representan la amenaza sísmica de la ciudad en relación con los pares magnitud-distancia, se estableció el escalamiento de los datos de los acelerogramas con la finalidad de alcanzar aceleraciones espectrales de 0.25g para fuentes corticales y 0.15g para fuentes intraplaca.

9. Se establecieron 4 perfiles geotécnicos con la finalidad de realizar la determinación a detalle de los periodos de vibración fundamental del suelo ( $T_s$ ) con respecto a las propiedades mecánicas y dinámicas de cada uno de los estratos. Se identificó, que entre las calles 60 y 120, existen en desarrollo proyectos de edificaciones de hasta 16 niveles y periodos de vibración entre 0.8s y 1.5s; sin embargo, predominan las edificaciones con periodos de vibración de 0.1s a 0.23s, y que son subyacidas por periodos de suelo de 0.17s a 0.21s.
10. Para obtener las respuestas sísmicas se implementaron modelaciones unidimensionales de dos sitios de análisis haciendo uso del software Deepsoil V7.0 mediante un análisis lineal equivalente. En cada uno de los sitios analizados se establecieron nueve distintos escenarios con el fin de contemplar la variación de los datos en relación con los pesos unitarios, las velocidades de onda de corte, módulos de corte normalizados y amortiguamientos de cada estrato de suelo. El primer escenario, correspondió al perfil determinístico y los ocho escenarios adicionales fueron obtenidos realizando la variación de las propiedades de los suelos en función de la desviación estándar de los datos.
11. Se realizó la selección de las estructuras teniendo en cuenta la tipología predominante en cada uno de los sitios de análisis y en cercanías. En consecuencia, para el sitio de análisis 1 era necesario realizar las modelaciones suelo, sismo e incluyendo edificaciones de 2 niveles en mampostería confinada y vigas de cimentación; además, edificaciones de 3 niveles en pórticos de concretos resistentes a momentos con cimentación superficial tipo zapata. Por otro lado, para el sitio de análisis 2 se contemplaron edificaciones de 2 niveles en mampostería confinada y vigas de cimentación y de 5 niveles con sistema estructural aporticado y cimentación superficial tipo losa.
12. Se establecieron simulaciones de cada una de las edificaciones seleccionadas para el análisis de ISSE en el software de análisis estructural ETABS V19.0, con la finalidad, de conocer las propiedades de cada elemento estructural y así generar pórticos simplificados en dos dimensiones. Lo anterior, permitió modelar elementos tipo plate que simularan las características dinámicas de rigidez y resistencia de las estructuras tridimensionales.
13. Durante el desarrollo del presente proyecto se establecieron los siguientes mapas:
  - Caracterización geotécnica.
  - Caracterización estructural.
  - Velocidad de onda de corte del suelo ( $V_{s30}$ ).
  - Periodos fundamentales de vibración del suelo ( $T_s$ ).

- Zonificación del periodo de vibración del suelo ( $T_s$ ) con respecto a las categorías estructurales para verificar la posibilidad de resonancia sísmica.
- Índice de resonancia sísmica (IRS).
- Índice de Deriva Máximo (IDM).
- Edad de la edificación (Antigüedad).
- Zonificación por Interacción Sísmica Suelo-Estructura.

## 10.2. Limitaciones

1. Pese a en el presente proyecto se realizó una minuciosa y cuidadosa caracterización tanto geotécnica y estructural del area de estudio, la calidad de los estudios geotecnicos realizados previamente limitaron la obtención de información completa, especialmente sobre el perfil geotécnico C-C'.
2. Durante el desarrollo de la caracterización estructural, se intento identificar propiedades estructurales particulares de cada edificación, sin embargo, por el tiempo establecido para su ejecución, no permitió identificar características a detalle de cada estructura, con lo que se hubiese obtenido a mayor grado de confiabilidad las propiedades de resistencia, rigidez y comportamiento dinámico de las edificaciones.

## 10.3. Conclusiones

1. Una vez definida la caracterización estructural, se identificó que las edificaciones de mayor predominancia sobre la zona de expansión oriental de la ciudad de Ibagué, son las de 2 niveles en mampostería confinada sobre vigas de cimentación; además, edificaciones de 5 niveles en mampostería estructural con elementos tipo vigas en su cimentación. Por último, edificaciones de 12 niveles construidas en muros estructurales en concreto sobre losas de cimentación.
2. Las curvas dinámicas de degradación del módulo de corte establecidas por Darandelli (2001) y Zhang (2005) y las curvas implementadas en la Microzonificación Sísmica de Ibagué del año 2006 y 2020, presentan gran similitud con la curva dinámica creada en el desarrollo del proyecto, para los suelos tipo arcilla. Ahora bien, la curva de variación del amortiguamiento definida en el desarrollo del proyecto mostró similitud hasta deformaciones aproximadas de 0.02% con las curvas de los autores mencionados. A partir de dicha deformación, conserva similitud con las curvas de variación de amortiguamiento dadas por las Microzonificaciones de Ibagué de los años 2006 y 2020.

3. Las curvas dinámicas de degradación del módulo normalizado y de variación del amortiguamiento para los suelos limosos dadas por Menq (2003) muestran un comportamiento cercano a las curvas dinámicas obtenidas en el presente proyecto y las dadas por las Microzonificaciones de la ciudad. Sin embargo, en el caso de los suelos tipo arena, por las características y tipología de ensayos de laboratorio, no se obtuvieron curvas dinámicas; por lo anterior, se compararon las dadas por las Microzonificaciones de Ciudad de Ibagué de los años 2006 y 2020 y las establecidas por los autores Zang (2005), Seed & Idriss (1970) y Andrus (2003).
4. De acuerdo con la comparación de las desagregaciones de amenaza sísmica, se concluyó que la amenaza sísmica de la ciudad de Ibagué se encuentra condicionada a fuentes sísmicas corticales con distancias de ruptura de 0km a 50km y magnitudes de hasta 8.8Mw; así mismo, por fuentes sísmicas intraplaca con distancias de ruptura entre 100km a 180km y magnitudes de hasta 8.8Mw. Ahora bien, las aceleraciones espectrales en roca son de 0.25g para fuentes corticales y de 0.15g para fuentes sísmicas intraplaca.
5. Con base en la comparación de los periodos de vibración de cada edificación ( $T_e$ ) con respecto al periodo de vibración fundamental del suelo ( $T_s$ ), lo cuales varían entre 0.08s a 0.42s, se concluyó, que las edificaciones con mayor posibilidad de generar fenómenos de resonancia sísmica son las de categoría baja y media, que representan el 98% de las edificaciones dentro del área en estudio.
6. Los espectros de respuestas dados por la Microzonificación Sísmica del año 2006, mostraron que los periodos de vibración en los cuales se presentan las máximas aceleraciones espectrales son similares a los obtenidos en las modelaciones unidimensionales del presente proyecto; sin embargo, los valores de las aceleraciones máximas son inferiores a la del espectro de diseño de la NSR-10. En cuento a los espectros de respuesta entregados por la microzonificación sísmica del año 2020, estos arrojaron aceleraciones máximas de que van desde 0.58g a 0.85g para el sitio de análisis 1 y de 0.64g a 0.79g para el sitio de análisis 2. Por otra parte, los periodos de vibración en los cuales ocurren las máxima aceleraciones van desde los 0.1s hasta 0.3s, es decir, edificaciones de 1 a 3 niveles.
7. Sobre el polígono de trabajo específicamente entre las calles 60 y 120, predominan edificaciones con periodos de vibración de 0.11s a 0.23s, que son subyacidas por suelos con periodos de vibración de 0.17s a 0.21s, lo que indica posibilidad de generar fenómenos de resonancia sísmica sobre edificaciones de aproximadamente 3 niveles. En primera instancia por la interacción con los eventos sísmicos corticales que se generen a distancias menores a 50km como los generados en las fallas de Ibagué, Cucuana, Romeral, Palestina y Magdalena; además, eventos sísmicos

intraplaca específicamente en la zona de Beniof intermedia. En segunda instancia, por la cercanía de los periodos de vibración con los periodos de vibración fundamental del perfil de suelo dentro de un rango de variación del  $\pm 10\%$ .

Por otra parte, entre las calles 120 y 145 existen grandes zonas no construidas y sin información de futuros proyectos de urbanismo; sin embargo, se espera que la tendencia en la tipología de construcción actual (construcción vertical), se conserve; por ende sus periodos estructurales serán muy superiores a los periodos fundamentales de vibración de los suelos; reduciendo la posibilidad de fenómenos de resonancia por Interacción Sísmica Suelo-Estructura.

8. Las respuestas sísmicas en superficie para un amortiguamiento del 5% fueron superpuestos con los espectros de respuesta obtenidos en las Microzonificaciones sísmicas de la ciudad de Ibagué y el espectro de diseño dado por NSR-10 para un perfil de suelo tipo C; estableciendo que las edificaciones con posibilidad de generar efectos adversos por Interacción Sísmica Suelo-Estructura son las estructuras de 2 a 5 niveles.
9. Al realizar la comparación de las respuestas sísmicas arrojados por las modelaciones bidimensionales con los resultados dados por las modelaciones unidimensionales; se concluyó, que en ambos casos la respuesta sísmica en campo libre frente a una amenaza sísmica cortical es similar, dando diferencial de aceleración máxima espectral de 0.05g. Sin embargo, en el análisis lineal equivalente, el periodo de vibración en el cual se inicia el aumento en las aceleraciones es de 0.1s y en el análisis bidimensional inicia en 0.2s, lo que generó que el pico máximo del espectro se desplazara hacia la derecha de la gráfica. Frente a la amenaza sísmica intraplaca, las modelaciones unidimensionales arrojaron aceleraciones espectrales de hasta 0.82g en periodos de hasta 0.42s, mientras que las modelaciones bidimensionales mostraron aceleraciones espectrales cercanas a 0.66g ampliando el rango de periodos de vibración desde 0.1s hasta 0.6s.

En retrospectiva, lo anterior se debe principalmente a los datos de entrada en cada tipo modelación; es decir, en el análisis lineal equivalente se deben establecer las curvas dinámicas específicas para cada estrato de suelos, mientras que en las modelaciones bidimensionales se deben ingresar como datos de entrada las propiedades avanzadas como los coeficientes de amortiguamiento Rayleigh ( $\beta$  y  $\alpha$ ) y propiedades de resistencia y rigidez de los estratos de suelo. Lo anterior, origina variaciones numéricas por el manejo interno de la información en cada software.

10. Las modelaciones bidimensionales del sitio de análisis 1, permitieron establecer que aunque las máximas amplificaciones se presentan en periodos superiores al periodo de vibración fundamental de la estructura, existe posibilidad de generarse

fenómenos de resonancia por ISSE; ya que se generan amplificaciones en las aceleraciones espectrales justamente en el valor equivalente al periodo fundamental de vibración. Por otra parte, para el caso de la edificación de 5 niveles se concluyó que pese a que las amplificaciones máximas se dan en periodos inferiores a los de la estructura y que el riesgo por ISSE disminuye, las señales serán amplificadas en alrededor de 3 veces la aceleración en roca lo que probablemente pueda generar daños estructurales al momento de un evento sísmico.

11. Los desplazamientos horizontales obtenidos, permitieron concluir que las edificaciones de 2 niveles las cuales son las predominantes en el area de estudio, presentarán desplazamientos horizontales mayores a las derivas permitidas por la NSR-10, frente a la amenaza sísmica cortical; ahora bien, frente a la amenaza intraplaca, sus desplazamientos no superarán la deriva permisible. Por otra parte, las edificaciones de 3 y 5 niveles alcanzarán desplazamientos en el último nivel frente a la amenaza sísmica cortical de 4cm y 4.9cm y frente a la amenaza sísmica intraplaca de 2cm y 2.5cm, respectivamente.
12. El análisis por Interacción Sísmica Suelo-Estructura permitió establecer el mapa de Zonificación de la Zona de Expansión Oriental de la Ciudad de Ibagué, arrojando que aproximadamente 29.127 edificaciones se encuentran en zona de riesgo alto y muy alto, 1.447 construcciones en riesgo medio y tan solo 2.084 edificaciones en riesgo bajo de generar fenómenos negativos por Interacción Sísmica, Suelo-Estructura.

#### **10.4. Recomendaciones**

1. Se hace necesario para proyectos futuros contar con estudios geológicos, hidrológicos y morfológicos a mayor detalle, contemplando la variación geológica entre zonas donde predomina el abanico de Ibagué, Batolito de Ibagué y los granitos de Ortega hacia el sur de la ciudad de Ibagué; estos dos últimos, contemplando la delimitación de cobertura dentro del área de la ciudad de Ibagué, que se han evidenciado en estudios recientes de los 2 últimos años.
2. Dentro del alcance del presente proyecto se obtuvo mapas de los análisis de interacción Sísmica Suelo- Estructura sobre el área de estudio, sin embargo, es necesario realizar la actualización permanente de los proyectos en proceso de licenciamiento y en proyección sobre las áreas sin información (áreas no sombreadas en los mapas obtenidos), lo que permitiría fortalecer la caracterización estructural y geotécnica y así evitar y/o minimizar la toma de decisiones bajo grandes suposiciones y por ende establecer mayor grado de confiabilidad.
3. Para futuros proyectos se recomienda realizar como primera medida la complementación de la caracterización tanto geotécnica como estructural; así

mismo, establecer análisis de vulnerabilidad sísmica, con la finalidad de establecer las probabilidades de daños en las estructuras. En segunda instancia, establecer modelos 3D que permitan definir variables estructurales y geotécnicas a mayor nivel detalle y que permitan contemplar las variaciones en su respuesta sísmica por fenómenos de golpeteo por cercanía entre estructuras.

## Capítulo XI

### Referencias

- Acevedo, A. (2012). *Criterios Sismológicos para Seleccionar Acelerogramas Reales de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia para su uso en Análisis Dinámico*. Revista EIA, pp. 57-70.
- Alcárcel, F.A. y Gómez, J. Servicio Geológico Colombiano. (2020). Mapa Geológico de Colombia escala 1M 2020. Recuperado de [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc\\_1M2020.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc_1M2020.aspx), Junio 2020.
- Aki, K. (1988). Local Site Effects on Strong Ground Motion. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II- Recent Advances in Ground Motion Evaluation. June 27-30. Park City Utah.
- Alfaro, Andrés, y otros. (2001). Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué. Red Sismológica Regional Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima. Ibagué: s.n., Vol. 6, pp. 32.
- Ancheta, Timothy D, et al. (2013) PEER NGA-West2 Data Base. Pacific Earthquake Engineering Research Center. Berkeley: s.n, pp. 136.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá.
- Avilés. J, Pérez, L. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. s.l.: Revista de Ingeniería Sísmica No. 71, pp. 1-36.
- Barrero, D. et al., (1976). Prospección geoquímica en la región de Hato Viejo, Rovira Tolima. Inf.1702 Ingeominas. P31. Ibagué.
- Bommer, Julián and Acevedo, A. (2004). The Use of Real Earthquake Acelerograms as input to Dynamic Analysis, pp. 43-91.
- Botero, Jairo, y otros. (2004). Evaluación de los efectos inerciales de interacción dinámica suelo estructura para edificaciones ubicadas en Medellín. Revista Universidad EAFIT No. 134, pp. 90- 104.
- Cámara Colombiana de la Construcción - CAMACOL. (2020). Colombia Construcción en Cifras. Bogotá, Colombia: 20 de abril de 2020.



- Carlton, B. (2014). UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations An Improved Description of the Seismic Response of Sites with High Plasticity Soils. Organic Clays and Deep Soft Soil Deposits by.
- Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos – CEDERI (2014). Amenaza Sísmica en territorio Firme. Ibagué
- Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos – CEDERI (2014). Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué. Ibagué
- Centro de Información Municipal para la Planeación participativa - CIMPP. (2015). Proyecciones de población: cálculos elaborados por PNUD a partir de Censo DANE. Recuperado de <http://cimpp.ibagué.gov.co/> el 10 de junio de 2020.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018. Bogotá, Colombia: s.n., junio de 2018.
- Dobry, R., Borcherdt, R., Crouse, C., Idriss, I., Joyner, W., Martin, G., Power, M. Rinne, and Seed, R. (2000) New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions. Earthquake Spectra No. 1, pp.41-67.
- Erden, A., & Özgenç, B. (2018). The investigation of soil – structure resonance of historical buildings using seismic refraction and ambient vibrations HVSR measurements: a case study from Trabzon in Turkey. Acta Geophysica, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0208-0>.
- González, H. (1989). Descripción petrográfica de las unidades litológicas de la serranía de Naquén (Colombia) y posibles correlaciones estratigráficas. V Congreso Colombiano de Geología. Memorias, I, p. 31–49. Bucaramanga.
- Herrera B, L. (2013). Evaluación de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura de Edificaciones Construidas en Ladera. Maestría en Ingeniería Geotécnica. Universidad Nacional de Colombia.
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana. (2015). Estudio de amenaza y Microzonificación Sísmica, Vulnerabilidad Estructural y Evaluación de Escenarios de Daño. Bogotá:
- Jaramillo, M, y otros. (2000). Marco tectónico y Amenaza Sísmica de Ibagué. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotécnica. Bogotá.
- Kramer (1996), Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice- Hall.
- Lobo-Guerrero, A. (1987). Notas sobre la Falla de Ibagué, Ingeominas, Ibagué (informe interno).

- Lozano J. (2021). Análisis de Interacción Sísmica Suelo-Estructura para evaluar vulnerabilidad por resonancia sísmica en edificios entre 3 y 7 pisos en un sector de la localidad de Chapinero-Bogotá. Maestría en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.
- Monsalve J, Hugo y Ramos M, Tobías. (2007). Selección de Señales Sísmicas para Microzonificación de Ciudades, Caso: Armenia, Colombia, pp. 143.
- Morales (2011). Factores De Amplificación De Ondas Sísmicas En Cenizas Volcánicas. Programa de Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana.
- Nakamura, Y. (1989). A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, pp. 25-33.
- Mosquera, D., Núñez, A., Vesga, J. (1982). Mapa geológico preliminar de la plancha 244-Ibagué. Ingeominas, 1:100.000, Bogotá, Colombia
- Num, I. J., & Eng, M. (1993). Plate 1 Analysis of subsonic flow around an aircraft (Dassault Falcon) Courtesy of Prof. Ken Morgan, School of Engineering. University of Wales.
- Olarte Guarín, J. (2009). Espectros de diseño considerando interacción dinámica suelo estructura. Maestría en Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.
- Osorio, Jairo, y otros. (2008) Estudio Paleosismológico de la Falla de Ibagué. Bogotá: D'vinni Primera Edición. ISBN: 978-958-97896-7-4.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, Título A. NSR-10 (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia.
- Rezaeian, S., & Campbell, K. (2012). PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING Spectral Damping Scaling Factors for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions, (July).
- Rodríguez, Edgar, y otros (2013). Metodología para la respuesta dinámica del subsuelo en la Microzonificación sísmica de la ciudad de Tunja. Bogotá. ISSN 2346-4119.
- Secretaría de Planeación Municipal de Ibagué. (2014) Plan de Ordenamiento Territorial. Decreto 0823 de 2014. Ibagué.
- Seed, H., Ugas, C, and Lysmer, J. (1976). Site-Dependent Spectra for Earthquake-Resistant Design. Bulletin of the Seismological Society of America.

- Seed, H., Romo, M., Sun, J and, Lysme R, J. (1988). The México Earthquake of September 19, 1985 - relationships between soil conditions and Earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, Vol. 4, No. 4. pp. 687-729.
- Soriano. A. (1989). Interacción Dinámica Suelo-Estructura. Jornadas Técnicas sobre Ingeniería Sísmica. E.T.S. Ingenieros de Caminos. Barcelona, pp. 21-22.
- Taboada et al (2000). Geodynamics of northern Andes: subduction and intra–continental deformation (Colombia). *Tectonic*, 19, 787–813
- Verdugo, R. (2007). *Seismic Site Classification*. Santiago de Chile: CMGI Ltda.
- Wang, Y., Asce, M et al. (2007). Interpretation of Secant Shear Modulus Degradation Characteristics from Pressuremeter Tests, (December), 1556–1567.
- Wolf J. P. (1994). *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*. Editorial Prentice Hall, New Jersey. Estados Unidos de América, pp. 445.
- Yamin, L., Hurtado, A., Rincón, R., et al (2017). Probabilistic seismic vulnerability assessment of buildings in terms of economic losses. *Engineering Structures*, pp 138. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.013>.